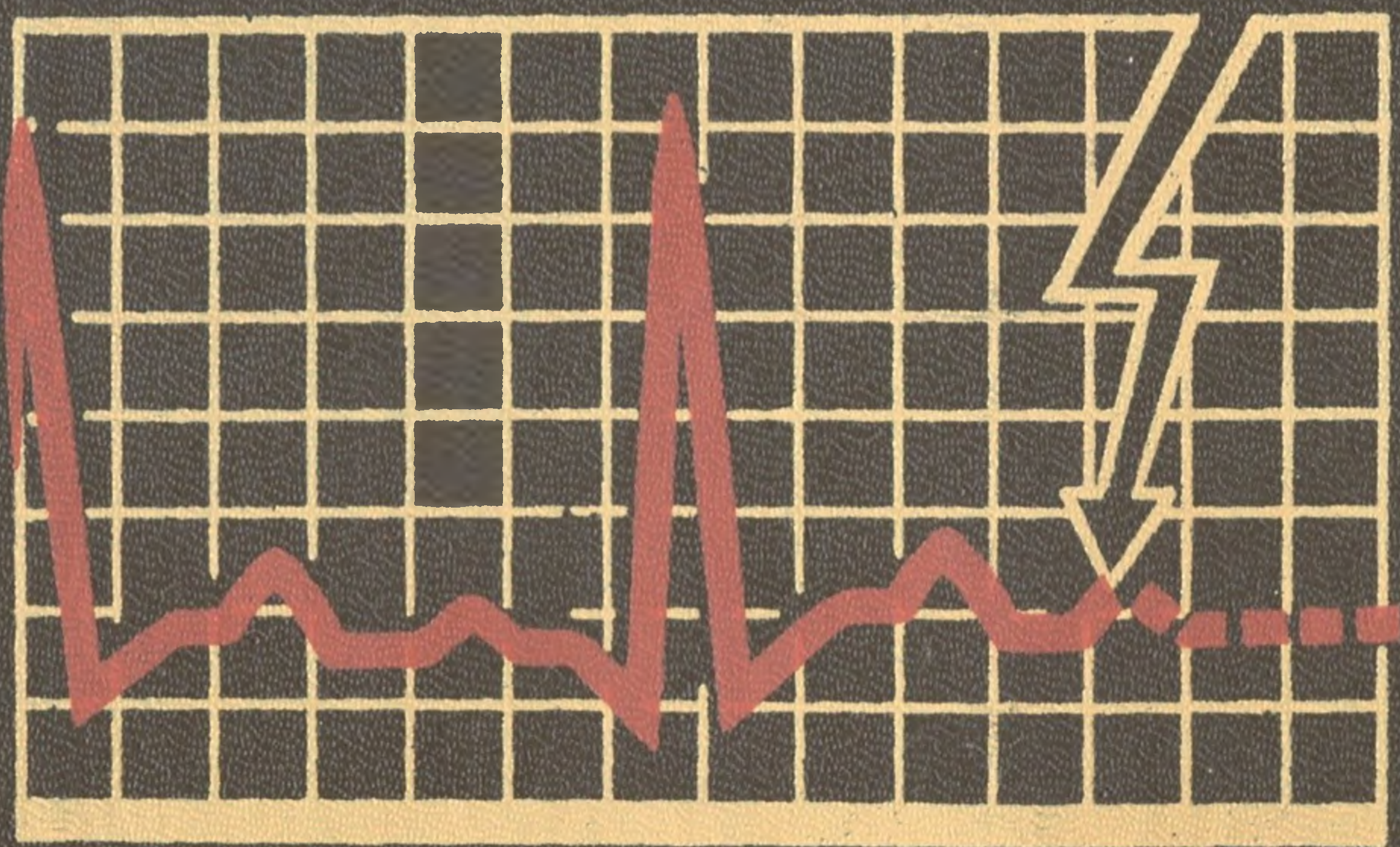


В. Е. Манойлов

ОСНОВЫ

электро-
безопасности



В. Е. Манойлов ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

В. Е. Манойлов

ОСНОВЫ

электро- безопасности

**5-е издание,
переработанное и дополненное**



**Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1991**

УДК 658.3.82.3:621.31

М23

ББК 31.29н

Манойлов В. Е.

М23 Основы электробезопасности.—5-е изд., перераб. и доп.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991.— 480 с.: ил.

ISBN 5-283-04547-1

Рассмотрены результаты изучения основ электробезопасности на базе новых представлений о механизме действия электрического тока на человека. Результаты использованы для определения нормативных требований электробезопасности. Изложены принципы проектирования и монтажа электрооборудования, обеспечивающие безопасную его эксплуатацию. Четвертое издание вышло в 1985 году. Настоящее издание переработано и дополнено новыми материалами и нормативными документами.

Для инженерно-технических работников, может быть полезна студентам вузов и учащимся техникумов.

М $\frac{2202090000-101}{051(01)-91}$ 116—91

ББК 31.29н

Производственное издание

Манойлов Владимир Евстафьевич

Основы электробезопасности

Редактор *Л. М. Пархоменко*

Художник переплета *В. Л. Черников*

Художественный редактор *Т. Ю. Теплицкая*

Технический редактор *Н. А. Минеева*

Корректор *Н. Б. Чухутина*

ИБ № 2861

Сдано в набор 03.05.90. Подписано в печать 26.11.90. Формат 84×108/32. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 25,2. Усл. кр.-отт. 25,2. Уч.-изд. л. 28,04. Тираж 70 000 экз. Заказ № 633. Цена 3 р.

Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. 191065, Ленинград, Д-65, Марсово поле, 1

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького при Госкомпечати СССР. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15

ISBN 5-283-04547-1

© Энергоатомиздат, 1985
© В. Е. Манойлов, с изменениями, 1991

*Светлой памяти профессора Е. О. Манойлова,
определившего направление
исследований автора
в области электробезопасности,
посвящается эта книга*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Характерной особенностью развития электроснабжения и соответственно электропотребления является опережающий рост их в сельском хозяйстве и строительстве — в тех отраслях народного хозяйства, где в настоящее время наблюдается максимальный удельный электротравматизм. Накоплен новый материал об электротравматизме в быту. Темпы снижения удельных показателей электротравматизма (число электротравм на 1 миллион киловатт-часов потребленной энергии и на 1 миллион жителей) замедлились, что явно недопустимо.

В пятом издании книги уточнены показатели электротравматизма по различным параметрам. Наряду с указанным неблагополучием в сельском хозяйстве, строительстве и быту положение коренным образом не меняется. При этом мероприятия, о которых подробно рассказывалось в предыдущих изданиях книги, сохраняют свою значимость. В их описания внесены соответствующие коррективы. Кроме новой главы, посвященной бытовому электротравматизму, включена новая глава «Статическое электричество и защита от него». Применение статического электричества значительно расширилось во многих технологических процессах, особенно там, где производятся и применяются полимерные материалы и используется порошковая технология.

Написана новая глава, посвященная методам оценки глубины и степени ожоговых поражений. Необходимость этой главы вызвана тем, что экспресс-диагностика глубины и степени ожоговых поражений имеет существенные недостатки.

Таким образом, объем рассматриваемых проблем расширен, но он неразрывно связан с основным текстом и основной задачей книги — дать четкие представления о механизме действия электрического тока и мероприятиях по защите от него.

Четко сформировалось мнение, нашедшее отражение в книге, о том, что защитные мероприятия от действия элек-

В принятых классификациях, в том числе и в международной, производственные травмы подразделяются на промышленные и сельскохозяйственные. Нам представляется, что в современных условиях, когда механизация и электрификация сельского хозяйства уже придали многим службам колхозов и совхозов (мастерские, фермы и т. д.) черты фабрично-заводских цехов, это подразделение в значительной мере утратило свой смысл.

Намного правильнее было бы поэтому при рассмотрении травматизма дифференцировать его по различным, строго очерченным отраслям народного хозяйства. Следует говорить, например, о травматизме на строительстве, при разработке недр, в тяжелой промышленности, в легкой промышленности, в химии, в энергетике, на транспорте, в связи, в сельском хозяйстве, в лесной промышленности, на коммунальных предприятиях, в спорте и, наконец, в быту. При таком подходе в основу классификации травм будет положено место их возникновения. Внутри каждой группы можно и нужно различать механические травмы, ожоги, поражения электрическим током, отравления, лучевые и другие повреждения.

Сказанное может служить основой для выработки исчерпывающей и вместе с тем четкой международной классификации травм. Необходимость в такой классификации весьма велика. К сожалению, приходится констатировать, что ничего существенного для разработки и принятия всеобщей классификации травм ни у нас в стране, ни за рубежом не сделано.

Перейдем к термину *травматизм*. Определение его дано в разное время И. Г. Руфановым, Г. Я. Эпштейном и В. В. Гориневской, успешно продолжившей исследования своего отца В. В. Гориневского, одного из основоположников отечественной травматологии. Наиболее полно, с учетом предложений названных авторов определение травматизма приведено в 26-м томе третьего издания БСЭ: «Травматизм — совокупность травм у определенных групп населения за определенный период времени; важный показатель влияния социальных условий жизни на состояние здоровья населения. При изучении травматизма учитываются вновь возникшие травмы... Преобладает в патологии у лиц молодого возраста (дети, подростки, молодежь); среди мужского населения в возрасте 15—30 лет травматизм — основная причина заболеваемости, инвалидности и смертности. Различают травматизм производственный (промышленность и сельское хозяйство) и непроизводственный (бытовой, транспортный, спортивный и др.).»

Рост производственного травматизма связан с развитием тяжелой промышленности.

Непроизводственный травматизм увеличивается в связи с быстрым ростом транспортного (дорожного) травматизма. Рост бытового травматизма связан с урбанизацией, внедрением в быт механических и электрических приборов».

Принимая определение травматизма, приведенное в БСЭ, мы предпочли бы сказать, что травматизм — совокупность травм, повторяющихся у тех или иных контингентов населения в аналогичной трудовой, коммунально-бытовой, транспортной, спортивной или военной обстановке; он выражается числом таких травм, пришедшихся за определенное время (обычно за год) на 10 000 или 100 000 жителей или на 1000 работающих соответствующей квалификации.

Эта формулировка позволяет обосновать и другие весьма важные травматологические термины, широко используемые нами в ходе дальнейшего изложения.

Под термином *несчастный случай* надо понимать происшествие, вызвавшее травму человека в результате совпадения по месту и во времени ряда аварийных положений и необычных (нетипичных) обстоятельств. Л. Л. Роднянский, С. Н. Стороженко и другие участники дискуссии, о которой ранее упоминалось, поставили под сомнение закономерность этого термина, считая, что понятие случайности, входящее в это определение, исключает планомерную борьбу с травмами. Но это соображение не имеет под собой достаточного основания, ибо случайность, являющаяся, как известно, одной из форм проявления необходимости, находится с ней в непрерывном единстве. Следовательно, термин «несчастный случай» не должен сам по себе расхолаживать лиц, призванных бороться с травматизмом, мешать тому, чтобы при каждом несчастном случае они искали (и находили!) причину его возникновения.

Более того, отнесение ряда травм к категории несчастных случаев выделяет их из всей массы травм и благодаря этому способствует их успешному предупреждению. Отказ же проводить грань между несчастными случаями и собственно травмами, образующими травматизм как совокупность травм, повторяющихся в аналогичных условиях, по существу, препятствует выявлению истинных причин потери трудоспособности рабочими в процессе их трудовой деятельности. Вот почему термин «несчастный случай» должен найти широкое признание. Оговоримся, что этот термин имеет еще и юридическое значение. В этом смысле к несчастным случаям относится любая потеря трудоспособности, вызванная травмой.

Должен быть узаконен и термин *очаг травм*. С медицинской точки зрения этот термин, возможно, безупречен, поскольку врачи (в частности, врачи-эпидемиологи) говорят об очаге лишь при контагиозных, т. е. заразных, заболеваниях. Но выше мы говорили о необходимости выработки травматологических терминов, отражающих не только медицинскую, но и техническую сторону проблемы, а данный термин как раз и может служить примером такой необходимости.

Под «очагом травм» следует понимать место (например, цех или участок на предприятии, иногда то или иное помещение, производственную территорию и т. д.), где имеется совокупность причин, обуславливающих или могущих обусловить появление повторяющихся травм. Разумеется, наличие очагов травм на наших предприятиях — явление нетерпимое, самой своей сущностью противоречащее характеру социалистической системы производства. И мы рады отметить, что в настоящее время на огромном большинстве советских предприятий травматизм в указанном понимании этого слова либо вовсе отсутствует, либо имеет резко выраженный локальный характер, затрагивая лишь временные и подсобные работы. Однако замалчивать на этом основании еще встречающиеся у нас очаги травм было бы в корне неправильно. Приходится констатировать, что бытовые травмы превращаются в травматизм, т. е. повторные травмы. Уже одно упоминание в отчетной документации, что на данном заводе, на данной фабрике или в данной отрасли народного хозяйства еще имеется очаг травм, приносит определенную пользу, так как привлекает внимание вышестоящих инстанций, способствует мобилизации коллектива на борьбу с травматизмом.

Больше всего противоречий встречается в литературе при оценке и определении причин травм, в то время как правильное понимание причин травм является обязательным условием выявления их очагов. Совершенно очевидно, что всякая травма всегда бывает вызвана какой-то причиной, которую необходимо как можно скорее и полнее установить, чтобы найти эффективные средства ее предотвращения.

На наш взгляд, следует различать травмы, вызванные: а) неудовлетворительным состоянием материально-технической части, т. е. предметов, непосредственно воздействовавших на организм человека; б) неблагоприятными условиями среды, окружающей человека и обусловившей травмирующее действие оборудования или какого-либо иного материального фактора, и, наконец, в) внутренним состоянием пострадавшего, вызвавшим его ненормальное взаимодействие с обо-

дованием или с иными материальными факторами окружающей среды.

Возможна и более детальная классификация причин травм — по роду оборудования, по виду технологических операций, по уровню квалификации персонала и т. д. Именно такой дифференцированный учет (а затем и анализ) телесных повреждений позволяет своевременно выявлять очаги травм.

Важно подчеркнуть, что сколь ни отличны друг от друга названные выше группы причин травм, все они зачастую бывают взаимосвязанными и действуют не изолированно, а совместно.

Правильная классификация травм по причинам их возникновения совершенно необходима для сопоставления уровней травматизма по отраслям народного хозяйства, для выявления типичных организационно-технических причин травматизма и характерных конструктивных дефектов оборудования и недочетов его эксплуатации и, главное, для обоснования мероприятий по борьбе с травматизмом.

Эти мероприятия (их называют часто путями снижения травматизма) также подлежат классификации. Подробный анализ травм по причинам их возникновения должен подсказать, что надо прежде всего делать в тех или иных конкретных ситуациях для предупреждения новых травм: следует ли браться за ликвидацию так называемых материально-технических причин травматизма, т. е. за ремонт или переконструирование предметов, которые наносят телесные повреждения, или же первоочередным является устранение организационных и санитарно-гигиенических причин травматизма, или же, наконец, всего важнее обратить внимание на личные свойства работающих (профессиональная подготовка, уравновешенность, внимательность, дисциплинированность и т. д.).

Упомянем еще об одном понятии, нуждающемся в уточнении, — о *травматологии*. Так обычно называют отрасль знаний, изучающую повреждения живого организма, а именно местные и общие болезненные процессы и состояния организма, возникшие под действием механических, термических, химических, электрических и каких-либо других факторов, нарушивших целостность органов и тканей и их функции. Все это верно, но заметим, что решающую роль в развитии этой науки в ее современном понимании играет все более глубокое изучение обстоятельств и причин травм — правильное определение физических, технических, психологических и социальных факторов, их вызвавших. Вот почему на травматологию

следует смотреть как на комплексную науку, успешное развитие которой во многом зависит не только от врачей, но и от инженеров, психологов, социологов и других специалистов.

От обсуждения общих терминов по травматизму перейдем к определению электротравмы.

В 1976 г. Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР утвержден ГОСТ 12.1.009—76 «Электробезопасность. Термины и определения», разработанный Всесоюзным научно-исследовательским институтом охраны труда ВЦСПС в Ленинграде (руководитель работы — кандидат технических наук Ю. А. Морозов), Московским энергетическим институтом (руководители работы — доктора технических наук Б. А. Князевский и П. А. Долин) и внесенный на утверждение отделом охраны труда ВЦСПС (заведующий отделом — А. П. Семенов). Наличие стандарта, несомненно, упорядочило анализ электротравматизма, способствовало повышению эффективности предлагаемых технических и организационных защитных мероприятий. В последние годы в ГОСТ 12.1.009—76 внесены некоторые изменения, но их явно недостаточно.

Время, прошедшее после утверждения стандарта, выявило его отдельные недостатки, требующие коррекции и уточнений. Так, по ГОСТ 12.1.009—76 под *электротравмой* следует понимать «травму, вызванную воздействием электрического тока или электрической дуги», и под *электротравматизмом* — «явление, характеризующееся совокупностью электротравм». По нашему мнению, под электротравмой лучше понимать нарушение анатомических соотношений и функций тканей и органов, сопровождающееся местной и общей реакцией организма и вызванное ненормальным состоянием электро- и радиооборудования или электрических сетей. Следует различать электротравмы:

а) связанные с такими нарушениями нормальной работы электрооборудования, при которых через тело человека возникает электрическая цепь или же в результате которых человек оказывается в электромагнитном поле большой напряженности;

б) связанные с такими нарушениями нормальной работы электрооборудования, при которых не возникает электрической цепи через тело человека, а поражение человека вызывается ожогами, механическими травмами, ослеплениями дугой и т. д.;

в) смешанные, при которых на пострадавшего совместно воздействуют факторы, указанные в обоих предыдущих пунктах; смешанной травмой называется травма, когда в момент

образования электрической цепи через тело человека одновременно действуют электрический ток, температура и проникающее излучение. Так, например, это возможно при работе на электроустановках, главным образом рентгено-технологических и им подобных, установках САПР автоматического управления и установках, в которых одновременно используются напряжения различных значений;

г) электротравмы, возникающие под действием электростатического и неэлектростатического напряжения. Реакция человека, пострадавшего при двух последних видах электротравм, как правило, резко отлична.

Подобное разделение электротравм при их учете, а также при последующей обработке статистических данных позволяет наиболее эффективно выявлять очаги возможных электротравм.

Можно уточнить и определение электротравматизма. Под электротравматизмом следует понимать совокупность электротравм, возникающих и повторяющихся в тот или иной период времени в некоторых группах населения в аналогичных трудовых, коммунально-бытовых и спортивных условиях. Эта формулировка соответствует приведенному выше определению травматизма вообще, но отличается от него исключением транспортных и военных условий. Это отличие обосновано тем, что электротравмы на транспорте происходят в основном с персоналом, обслуживающим электрооборудование, и, следовательно, включаются в категорию производственных травм. Можно было бы не включать в общее определение электротравматизма упоминание о спортивных травмах, ибо до настоящего времени сколько-нибудь заметного спортивного электротравматизма у нас, к счастью, не зарегистрировано. Однако это понятие все же оставлено в определении как напоминание о возможном возникновении спортивных электротравм, что имеет известное основание в связи с широким применением электричества в спортивных помещениях и все более частым использованием его для оценки хода спортивной борьбы и для регистрации спортивных достижений.

Анализ электротравм, изучение электротравматизма, проведенные ВНИИ охраны труда ВЦСПС в 1980 г., практика борьбы с электротравматизмом органов энергонадзора Минэнерго СССР выявили необходимость введения в стандарт понятия *очаг электротравм*. В общем виде содержание термина «очаг» раскрыто ранее, уточним его применительно к электротравме. Под очагом электротравм следует понимать цех или участок предприятия, технологический процесс, электрооборудование или участок электросети, где имеется совокуп-

ность причин, могущих вызвать электротравмы. В то же время из стандарта можно исключить понятия о фибрилляционном и ошутимом токах. В известной степени они отражают механистическое представление о взаимодействии электричества с живым организмом. Результаты проведенных в последние годы электрофизиологических исследований выявили значительно более сложный механизм взаимодействия электричества с человеком, показывающий нецелесообразность и даже опасность нормирования численных значений указанных токов. Причины, позволившие дать подобные рекомендации, рассмотрены в пятой и шестой главах. По-видимому, при пересмотре ГОСТ 12.1.009—76 возникнет необходимость и в других уточнениях.

О содержании, вкладываемом в понятие «основы электробезопасности». Проведенное в этом параграфе уточнение терминов позволяет раскрыть содержание настоящей книги. Под «основами электробезопасности» следует понимать совокупность организационных, технических, медицинских, административных и правовых мероприятий:

вытекающих из современного представления о механизме действия электрического тока или электрической дуги,

основанных на всестороннем изучении электротравм человека и животного, в частности на исследовании действия электрического тока на животное в эксперименте с максимально возможным физиологическим и техническим моделированием электротравм, на обследовании очагов электротравм, на анализе аварий электрооборудования;

направленных на повышение надежности как отдельных видов электрооборудования в процессе их проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации, так и электрических сетей в целом для устранения возможности возникновения несчастных случаев, вызываемых электрическим током.

1.2. Трактовка промышленного травматизма в капиталистических странах

Рассмотрим особенности электротравматизма в капиталистических странах. Жесткая конкуренция способствовала значительному улучшению качества оборудования и повышению его надежности. Это привело к существенному снижению некоторых видов электротравм. Но в то же время боязнь рабочих потерять работу сопровождается стремлением обойти трудности, возникающие при выполнении правил безопасности, а следовательно, появлением в связи с этим нарушений, приводящих к электротравмам, там, где их обычно

не наблюдалось. Объективности ради надо отметить, что показатель удельного электротравматизма (число электротравм на 1 миллион киловатт-часов потребленной энергии или на 1 миллион жителей) в капиталистических странах снижается, в то время как в Советском Союзе темпы снижения удельных показателей электротравматизма замедлились и в ряде случаев эти показатели стали хуже, чем в зарубежных странах. Это делает проблему электробезопасности у нас особенно важной.

Подход к охране труда. На капиталистических предприятиях проводится немалая работа по охране труда и технике безопасности. Многие мероприятия, связанные с автоматизацией защиты лиц, выполняющих те или иные технологические операции (и особенно использование робототехники), так же как и различные средства личной защиты, без сомнения, заслуживают нашего внимания. Тем не менее, в ряде отраслей капиталистической промышленности травматизм еще очень велик. Объясняется это тем, что владельцы предприятий оценивают каждое предлагаемое им мероприятие по охране труда прежде всего с точки зрения прибыльности. Считается более выгодным затратить средства на защиту квалифицированных рабочих и тем предотвратить их выход из строя, нежели обучать взамен них новых. Этим можно отчасти объяснить большое число травм у неквалифицированных рабочих: их легко заменить и, следовательно, идти на существенные затраты по охране их труда, с точки зрения капиталиста, нет расчета — этот расход не окупится.

В американской литературе описывается новая категория рабочих — «списочные». Это — лица, выполняющие работу, явно наносящую вред их здоровью, и по мере утраты трудоспособности списываемые из состава работников предприятия. Появление «списочного состава» работающих не отразилось на законодательстве США и других капиталистических стран.

Инженерная психология о причинах травматизма. Представители психосоматического направления в изучении травматизма, особенно многочисленные в США, перекладывают на пострадавших ответственность за несчастные случаи, происшедшие на производстве. Психосоматики ссылаются при этом на якобы свойственное рабочим конституциональное предрасположение к травмам. Утверждается, что причины трудовых травм коренятся в недисциплинированности рабочего, в возникающих у него отклонениях от нормального психофизиологического состояния.

На первый план выдвигается роль «человеческого фактора», «индивидуальной адаптации» и т. п. На страницах зарубежной буржуазной печати появляются сообщения о «рабочих — рецидивистах по несчастным случаям», о «рабочих — потенциальных творцах несчастных случаев» и т. д. В ряде исследований пропагандируется мысль о небрежности и неосторожности рабочего как главных причинах травматизма.

Были сделаны попытки подвести под эти высказывания «научную базу» с помощью новой науки — инженерной психологии. Не отрицая очевидной необходимости изучать психологию рабочего в процессе труда, следует отметить особенность этого изучения в капиталистических странах. Она выражается в том, что с помощью инженерной психологии делается попытка обосновать положение, согласно которому основной причиной травм является психологическое состояние рабочего, обусловленное непониманием общих интересов (!) рабочего и владельца предприятия, недисциплинированностью, якобы изначально присущей рабочему, семейными неурядицами и т. п.

Генеральный директор английского королевского общества по предупреждению несчастных случаев Б. Янг в статье «Несчастные случаи — необходимы ли они?» [115] пишет, что в Англии 16 % несчастных случаев на производстве вызываются нарушением правил технологии и эксплуатации оборудования, а 84 % — падением различных предметов и неисправностью транспорта (включая краны, лифты, автокраны). Но при всех обстоятельствах 80 % травм «произошли по прямой вине пострадавшего».

Наряду с этим в зарубежной печати встречаются и статьи ряда ученых, которые, опираясь на факты, делают попытку объективно осветить причины роста промышленного травматизма. Так, в статье В. Лафита [105], рассматривающего роль человеческого фактора при несчастных случаях на производстве, утверждается, что 90 % производственных травм происходит вследствие плохой организации труда и только в 10 % их виноват непосредственно сам пострадавший. По мнению этого автора, основной причиной травматизма является интенсификация труда, влекущая за собой преждевременное изнашивание организма. Другой иностранный автор, врач Ф. Гулен, секретарь французского национального профсоюза врачей, заявляет, что в условиях капитализма проблема травматизма не может быть решена. С этим заявлением перекликаются слова бывшего генерального директора Всемирной организации здравоохранения доктора Кандау

о том, что «в несчастных случаях нет случайности». Отмечается связь травматизма с наркоманией, которая в капиталистических странах да и у нас растет и даже при легких электротравмах приводит к крайне сложным последствиям, ранее не наблюдавшимся. Наркомания, алкоголизм и преступность — это фон, придающий в современных условиях проблеме травматизма особую остроту.

Известный английский физик Дж. Бернал подвергает критике попытки авторов некоторых статей использовать положения инженерной психологии для оправдания неблагополучия с травматизмом. «Она служит также тому, — пишет этот автор, — чтобы отбить у людей охоту пытаться изменить эти учреждения, и чтобы они пренебрежительно отзывались об этих попытках как о плохом эмоциональном приспособлении».

Таким образом, в странах капитализма проблема профилактики травматизма не ставится во всей своей полноте; более того, как видно из изложенного, там даже делаются попытки обосновать неизбежность травм.

1.3. Борьба с промышленным травматизмом в нашей стране

Становление отечественной травматологии. Лечение травм, развивающееся веками по мере накопления и использования народного опыта, относится к числу наиболее древних видов медицинской помощи. В России лекари-профессионалы, занимавшиеся лечением ран и переломов, длительное время назывались костоправами [38]. Потребность в них росла, и в средних веках была создана первая в стране школа «костоправного дела». В первой четверти XVIII века такие школы действовали уже и в Москве, и в Петербурге, и в Кронштадте. Подготовка этих специалистов значительно расширилась во второй половине XVIII века с созданием Московского университета (1755 г.) и петербургской Медико-хирургической академии (1798 г.).

В этой академии с первых же дней ее организации большое внимание уделялось изучению воздействия физических факторов на человека и поискам путей лечения последствий этого воздействия. Не случайно также, что именно в России появились едва ли не первые в мире печатные работы по травматологии. Большой след в науке оставила деятельность выдающегося русского врача-хирурга Е. О. Мухина (1766—1850 гг.). Им была предложена первая в истории науки классификация травм. Ему же принадлежит первое на русском

ПЕРВЫЯ НАЧАЛА КОСТОПРАВНОЙ НАУКИ.

с о ч и н е н н ы я

Докторомъ Медицины и Хирургіи, Операторомъ, обществъ: Парижскаго Гальваническаго Корреспондентомъ, Гештингенскаго позивальнаго искусства, Московскаго соревнованія врачебныхъ и физическихъ наукъ Конференціи ординарнымъ, Санктпетербургскаго Медико-Филантропическаго Комитета почетнымъ членомъ, Медико-Хирургической Академіи Адъюнктъ-Профессоромъ, преподающимъ весь кругъ Медико-Хирургическихъ наукъ въ Московской Духовной Академіи, Докторомъ Голицынской публичной больницы, Надворнымъ Совѣтникомъ,

ЕФРЕМОМЪ МУХИНЫМЪ.

изданнымъ изданиемъ сочинителя,

въ пользу соотечичей и для употребленія учащихся Медико-Хирургической наукъ въ Московской Духовной Академіи, съ приложеніемъ тридцати семи чертежей.

МОСКВА,
въ Типографіи С. Селивановскаго
1806

Рис. 1.1. Титульный лист первой книги по травматизму, изданной в России

языке руководство по травматологии «Первые начала костоправной науки» (рис. 1.1).

Кругозор крупнейшего и образованнейшего ученого позволил Е. О. Мухину не ограничиваться в своих работах механическими травмами — ушибами, переломами, вывихами. Он смело описывал и другие виды телесных повреждений, внимательно изучал их последствия. И, что особенно важно для нас, изучал также поражения электрическим током, хотя последний в то время едва-едва начал получать практическое применение.

Выходу книги Е. О. Мухина предшествовало появление монографии замечательного русского физика профессора Медико-хирургической академии В. В. Петрова, в которой впервые обращалось внимание на опасность для человека электрического тока. Эту монографию, по-видимому, и использовал Е. О. Мухин. Во всяком случае он уделял внимание электрическим поражениям, исследуя их на животных. Есть основания полагать, что именно за эти исследования его избрали корреспондентом первого в мире научного электротехнического (Парижского гальванического) общества и ординарным членом Московского общества соревнования врачей и физических наук.

Значительного развития отечественная, да и мировая травматология достигла в середине XIX столетия в связи с деятельностью выдающегося русского хирурга Н. И. Пирогова (1810—1881 гг.). Будучи учеником Е. О. Мухина, Н. И. Пирогов со свойственной ему прозорливостью, размахом и глубиной развивал основанное Е. О. Мухиным учение о травме. Он создал свое знаменитое учение о шоке и ранах, доказал необходимость своевременной и квалифицированной помощи при травмах. Академик Н. Н. Бурденко писал:

«Главная заслуга Пирогова перед медициной... в создании его учения о травмах и об общей реакции организма на травмы, о местной очаговой реакции на травмы, в учении о ранениях, об их течении и осложнениях».

Надо сказать, что рассмотрение травмы и ее последствий как общей реакции организма позднее нашло подтверждение в работах И. П. Павлова.

Раннее развитие травматологии в России, а также изучение действия электрического тока на живой организм, весьма активно проводившееся в Медико-хирургической академии уже в первой половине XIX века, естественно, обусловили то, что именно в России появились и первые в мире исследования по электротравме. Они принадлежали В. В. Петрову и боль-

шому энтузиасту фабрично-заводского здравоохранения профессору В. В. Гориневскому.

Широкая научная разработка вопросов промышленного травматизма, включая и выяснение условий труда и профессиональных вредностей, велась с конца XIX века основоположниками промышленной гигиены труда Ф. Ф. Эрисманом, А. В. Погожевым, Г. В. Хлопиным и другими. По их инициативе и под их руководством в дореволюционной России создаются, преимущественно на частные пожертвования, ортопедические и травматологические учреждения. Хотя и малочисленные, они вносят существенный вклад в отечественную травматологию. В частности, именно фабрично-заводским и земским врачам-общественникам принадлежат первые статистические данные о травматизме. Такие сведения содержатся, например, в работах фабричного, а позднее земского врача К. М. Языкова, в материалах I Всероссийского съезда фабричных врачей, состоявшегося в 1909 г. На этом съезде Д. П. Никольский сообщил следующие поистине трагические данные о травматизме за 1900—1905 гг.: 65—68 тысяч несчастий (травм) на 100 тысяч рабочих. А. В. Погожев писал (цитируем по работе [38]):

«Самые лютые войны, самые отчаянные схватки по процентной убыли из строя раненых являются лишь невинной забавой обеих враждующих сторон сравнительно с той убылью, какая замечается среди фабричных рабочих».

Е. А. Логинова приводит в своей весьма содержательной монографии [38] данные, из которых видно, что в течение одного года в царской России погибало в результате производственных травм около 6000 человек, а около 40 000 человек получали тяжелые увечья. Она указывает, что «систематического учета и регистрации несчастных случаев в дореволюционной России не было». Закон об обязательной регистрации несчастных случаев был введен в действие 2 июня 1903 г. Он носил название «Извещение о несчастных случаях», однако особого регистрационного документа предусмотрено не было. В течение последующих 7—8 лет врачебная общественность предлагала ввести обязательные карточки регистрации несчастных случаев, но они так и не были введены. Статистикой в лучшем случае охватывались смертельные поражения, а также травмы, вызывавшие потерю трудоспособности на срок свыше 10—14 дней.

Метод травматологии в СССР — профилактика. Советское здравоохранение с первых лет своего существования повело решительную борьбу с травматизмом. Профилактическое направление нашего здравоохранения, подкрепленное его

организационными принципами (участковое обслуживание населения по месту его жительства и участково-цеховое обслуживание промышленных рабочих по месту их работы в сочетании с широким применением диспансерного метода), создает условия для предупреждения всех видов травматизма.

Особенно быстро снижается производственный травматизм. Так, благодаря механизации и автоматизации трудовых процессов, внедрению рациональных методов труда и передовых технологических процессов, быстрому росту культурного уровня и производственной квалификации трудящихся, использованию современных средств техники безопасности и созданию благоприятных санитарно-гигиенических условий труда производственный травматизм за 50 лет (с 1930 по 1980 г.) снизился в нашей стране: в угольной промышленности в 3,2 раза, в текстильной промышленности в 4 раза, в металлургической в 3 раза, в машиностроении в 5 раз, в нефтяной и газовой промышленности в 8 раз [19].

Это — логическое следствие того, что охрана труда в нашей стране является функцией государства. Особенно четко эти обязательства государства отражены в «Основах законодательства Союза ССР и союзных республик о здравоохранении», принятых на седьмой сессии Верховного Совета СССР 19 декабря 1969 г.

В этом же 1969 г. Президиум Совета Министров СССР и Президиум ВЦСПС рассмотрели состояние электротравматизма в народном хозяйстве и обязали советы министров союзных республик, министерства и ведомства осуществить необходимые мероприятия по устранению возможности электротравм. Аналогичные поручения даны ЦК профсоюзов. Во исполнение этих постановлений проведена огромная работа: только на предприятиях Минэнерго СССР заменено свыше миллиона единиц оборудования, не отвечавшего новым требованиям электробезопасности. Немало сделано и в других отраслях народного хозяйства. В большинстве министерств введен ведомственный энергонадзор, изданы единые правила электробезопасности, разработано 25 государственных стандартов, улучшились учет и расследование несчастных случаев. Все это — конкретные проявления гуманизма социалистического государства.

Текст «Основ законодательства о здравоохранении» начинается так: «Охрана здоровья народа — одна из важнейших задач Советского государства».

Это чрезвычайно важное общее положение конкретизируется рядом законоположений, указаний и разъяснений. Основная работа по предупреждению травматизма вменена

государством в обязанность хозяйственным организациям и их службам техники безопасности, имеющимся на каждом предприятии. Мероприятия по борьбе с травматизмом входят важнейшей составной частью в разрабатываемые на предприятиях единые комплексные планы оздоровления условий труда. К профилактике травматизма привлечены общественные санитарные инспекторы и санпостовцы Общества Красного Креста. Наконец, весьма активное участие в борьбе с травматизмом принимают советские профсоюзы, имеющие в своем составе специальные технические инспекции, которые наделены большими правами и полномочиями.

Обширная сеть специализированных лечебно-профилактических учреждений, 20 научно-исследовательских травматологических институтов министерств здравоохранения, не говоря уже о десятке институтов охраны труда ВЦСПС, создают в нашей стране мощную базу для борьбы с травматизмом.

В настоящее время в СССР на долю производственных травм приходится, судя по литературным данным, 8—10 % всех травм. Одной из характерных особенностей промышленного травматизма у нас надо считать то, что легкие травмы, не приведшие к потере трудоспособности или же вызвавшие лишь кратковременную утрату ее, значительно преобладают над тяжелыми. Благодаря системе обязательной регистрации промышленный травматизм изучен и описан лучше других видов травматизма. Это дает возможность выявить и общие закономерности, необходимые для разработки защитных мероприятий применительно к электротехническому оборудованию и электрическим сетям промышленного, сельскохозяйственного и коммунально-бытового назначения. Как уже отмечалось, снижения электротравм в сельском хозяйстве и на коммунальных предприятиях не произошло.

ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ, ЕГО УЧЕТ И ХАРАКТЕРИСТИКА

2.1. Из истории электробезопасности

Первые представления об опасности электрического тока. О том, что электрический разряд действует на человека, стало очевидным в последней четверти XVIII века. Одно из первых обстоятельных описаний этого действия принадлежит Ж. Марату, видному деятелю Великой французской революции 1789—1794 гг. Англичанин А. Уориш, итальянцы Л. Гальвани, А. Вольта и ряд других ученых установили, что на человека действует разряд, полученный не только от источника статического электричества, но и от электрохимического элемента. Однако никто из названных исследователей не указал на опасность этого действия на человека. Впервые установил эту опасность изобретатель первого в мире электрохимического высоковольтного источника напряжения В. В. Петров.

Создав в петербургской Медико-хирургической академии (ныне Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова) отлично оборудованную для своего времени физическую лабораторию, В. В. Петров приступил к систематическому изучению действия электрического тока на организм животного и человека, а также к разработке мероприятий по защите человека от тока. Закономерно, что именно в этой академии был проведен ряд интересных исследований механизма взаимодействия электрического тока с человеком, имевших, правда, не только защитную, но и терапевтическую направленность.

С первых же номеров основанный в 1880 г. русский журнал «Электричество» начал систематическую публикацию на своих страницах сообщений о несчастных случаях, вызванных электрическим током. Такие же публикации стали появляться и в других русских технических журналах. Например, в журнале «Электротехник» только за период с 1898 по 1903 г. приведены данные более чем о 20 электротравмах, сопровождавшихся тяжелым исходом.

Уже в первые годы развития электротехники была достаточно четко выявлена меньшая опасность постоянного тока. Очень образно об этом написал В. Н. Чиколев [81]:

«Когда вы прикоснетесь к проводнику с постоянным током, то в момент прикосновения вы почувствуете сотрясение,

затем вы ничего или очень мало чувствуете, когда через вас проходит ток; только когда отнимете руки от проводников, вы снова испытаете такое же сотрясение. Я сам много раз нарочно прикасался к проводникам, чтобы рассеять этот страх, всегда вполне уверенный, что ничего со мной не произойдет. Совсем другое значение имеет переменный ток (или ток постоянного направления, но переменной силы), который изменяет свое направление и силу от 5000 до 10 000 раз в минуту. Прикосновение к таким проводникам действительно производит громадные сотрясения. Физиологическое действие постоянного тока можно сравнить с сильным механическим толчком или ударом, который опасен при очень громадном напряжении удара. Но во сколько раз слабее могут быть толчки, которые потрясут вас 10 000 раз в минуту, чтобы вы испытали страшное расстройство,— таково последствие прикосновения к проводникам с переменным током. Таким образом, опасность существует не от силы тока, который пройдет через вас, а, главным образом, от того, будет ли ток постоянный или переменный. Для городской канализации возможны к употреблению проводники с постоянным током, в этом случае страх опасности не существует».

В еще более категорической форме эту мысль В. Н. Чиколев изложил в статье «История электрического освещения» [81], где писал:

«При постоянных токах, какого бы напряжения они ни достигали, невозможны несчастные, иногда смертельные случаи, как при переменных токах».

В. Н. Чиколев считал, что электрический ток опасен не только значением, но и характером нарастания его, причем последнее, по его мнению, представляет большую опасность. Тем самым он предугадал основу современного представления о механизме электротравмы.

Серьезная опасность поражения электрическим током при эксплуатации электротехнического оборудования возникла в результате широкого применения переменного тока частотой 50 Гц. Однако обстоятельных данных о механизме действия электрического тока на человека в то время еще не было. Неизвестны были и достаточно простые и эффективные защитные мероприятия. Поэтому есть все основания считать, что электробезопасность как проблема возникла в последней четверти XIX века, и именно к этому времени относятся первые попытки ее разумного разрешения.

Первые правила электробезопасности. В 90-х годах прошлого века по инициативе П. Д. Войнаровского началась разработка правил пользования электрическими устройства-

ми высокого напряжения (до 3000 В). Выбор для критерия 3000 В возник в связи с тем, что большая часть Петербурга питалась от сети напряжением 3000/127 В. Эта работа была окончена в начале 1898 г., а 8 июля того же года были утверждены первые официальные законодательные документы, относившиеся к технике безопасности при устройстве и эксплуатации высоковольтных установок. Они носили название «Временные правила подземной канализации проводов высокого напряжения до 3000 В (от 250 В переменного тока и от 450 В постоянного тока)» и «Временные правила по производству работ и контролю сети подземной канализации проводов высокого напряжения». Доклад о правилах был сделан на Первом Всероссийском электротехническом съезде проф. П. Д. Войнаровским. В обсуждении доклада участвовали врачи-гигиенисты. Было принято весьма прогрессивное по тому времени предложение об обстоятельном расследовании всех случаев поражения людей электрическим током и молнией; причем если поражение привело к смерти пострадавшего, то рекомендовалось обязательное вскрытие и тщательное патологоанатомическое изучение тела пострадавшего. Вынесенные съездом решения относительно пользования электрическими установками и сетями привлекли внимание к профилактике электротравм.

Разработка правил продолжалась и после съезда. Правила расширялись и дополнялись с учетом результатов новых исследований по электротехнике, проводившихся в ту пору в России. В период между первым и вторым электротехническим съездами в области электробезопасности была проделана большая работа. Второй съезд по докладам П. Д. Войнаровского и П. С. Осадчего принял ряд принципиальных решений, относившихся к безопасному обслуживанию электроустановок. Так, за низкое напряжение было принято напряжение ниже 250 В относительно земли, для повышенного установлены пределы 250—750 В, а для высокого — выше 750 В. Прогрессивная роль П. Д. Войнаровского и П. С. Осадчего заключалась в том, что, предлагая нормирование пределов напряжения, они учитывали и необходимость снабжения электротехнических установок защитными средствами, создавая тем самым основы электробезопасности.

В 1911—1912 гг. в Петербурге произошло несколько электротравм, от которых пострадал персонал, обслуживающий электрооборудование театров и кинематографов. Обстоятельства возникновения этих травм привлекли к себе внимание общественности и были подробно рассмотрены в электротехнической секции Русского технического общества. В ре-

зультате этого были разработаны специальные правила безопасности при обслуживании электрооборудования зрелищных предприятий.

Вклад отечественных ученых в разработку проблем электробезопасности. Очень многое в этом отношении сделал А. А. Смуров. Интерес к вопросам электробезопасности возник у него еще в студенческие годы, что нашло отражение в его дипломном проекте. Затем он продолжал эти работы на кафедре техники высоких напряжений Электротехнического института, ныне Ленинградского электротехнического ордена Ленина института имени В. И. Ульянова (Ленина). На этой кафедре, заведующим которой он был избран в 1919 г., А. А. Смуров исследовал заземляющие устройства, определял опасное влияние линий электропередачи на провода связи, изыскивал наиболее выгодные в отношении безопасности режимы нейтрали, создавал надежные распределительные устройства. Совместно с ним эти исследования вели С. А. Хаецкий, Н. Н. Белянинов, К. С. Архангельский и И. Г. Фрейман [74].

Наиболее полно названные работы были отражены в монографии А. А. Смурова по электробезопасности [64], одной из первых в мировой литературе, написанных на эту тему. Названия трех ее основных частей: «Опасность токов высокого напряжения для жизни», «Опасность от токов высокого напряжения на линиях передачи энергии и меры защиты от этой опасности при эксплуатации и ремонте линий», «Влияние линий электропередачи на соседние установки слабого тока» — дают представление о рассмотренных проблемах.

Не потеряли научного значения результаты исследований школы А. А. Смурова и сейчас. Это особенно относится к определению электрического сопротивления тела человека, о чем можно судить хотя бы по следующим выдержкам из названной монографии:

«С повышением напряжения сопротивление тела резко уменьшается». «Сопротивление тела зависит от продолжительности приложения напряжения, причем оно со временем уменьшается. Так, при напряжении 10 В сопротивление тела от одной руки к другой в течение некоторого промежутка времени изменилось с $19 \cdot 10^3$ до $9 \cdot 10^3$ Ом. С другой стороны, при одинаковой величине и положении электродов после 15 мин приложения напряжения сопротивление тела оказалось равным: при напряжении 2 В — $16 \cdot 10^4$ Ом; при 6 В — $4 \cdot 10^4$ Ом и при 10 В — $8 \cdot 10^3$ Ом. При непосредственно следовавшем изменении сопротивления вторично при напряжении 2 В последнее не оказалось равным $16 \cdot 10^4$ Ом, но достигло только величины $4 \cdot 10^4$ Ом».

Приведенные строки показывают, что А. А. Смурову впервые удалось установить нелинейность электрического сопротивления тела человека — эту важнейшую характеристику, используемую при определении поражающих значений напряжений и токов. Только через год после выхода упомянутой монографии Н. Н. Малов и С. Н. Ржевкин, а затем и Х. Фрайбергер [95] получили аналогичные результаты.

Справедливости ради заметим, что монография А. А. Смурова к моменту ее опубликования была не единственным трудом на эту тему. Еще за год до нее увидело свет исследование И. Г. Фреймана «Радиотехника» [74], относящееся к проблеме электробезопасности на радиостанциях. Это исследование посвящено опасностям и вредностям при работе на радиоустановках, а также ограждению людей от возможного поражения электрическим током. И. Г. Фрейман рассмотрел весь комплекс вопросов охраны труда лиц, обслуживающих радиоустановки, указал на возможность не только акустической и электрической травм, но и вредного воздействия электромагнитного излучения поля на зрение. Заслуга И. Г. Фреймана состоит в том, что он первый подчеркнул тесную и непосредственную связь между электробезопасностью и надежностью оборудования. Возможно, именно потому, что на заре развития массового применения радиотехники один из ее основоположников поразительно четко сформулировал главные положения техники безопасности, число электротравм при работе на радиотехнических установках было невелико.

Большой вклад в разработку эффективных методов профилактических испытаний электрооборудования и в решение всего комплекса проблем, объединяемых понятием «электробезопасность», внесли кафедры охраны труда Ленинградского электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина), Московского энергетического института, Московского института электрификации сельского хозяйства, Московского института железнодорожного транспорта, Ленинградского института авиационного приборостроения, а также коллективы Всесоюзного научно-исследовательского электротехнического института имени В. И. Ленина, Государственной инспекции по промэнергетике и электронадзору и ее инспекций (ныне энергоинспекций) при энергосбытах (ныне энергонадзора) энергообъединений, ВНИИ охраны труда ВЦСПС (г. Ленинград), ОРГРЭС (ныне Союзтехэнерго) и ряда других организаций. Одно лишь перечисление этих институтов и организаций позволяет судить о размахе, с которым велись уже в ту пору работы по электробезопасности.

В 30-х годах происходит исключительно важное для развития электробезопасности событие — разрабатываются и внедряются «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей». После выхода Правил проведение ряда организационных мероприятий по технике безопасности, в особенности профилактических испытаний электрического оборудования, становится обязательным для электрических станций и сетей всех ведомств.

К концу 30-х годов относится разработка «Правил технической эксплуатации электрооборудования промышленных предприятий». Регламентация эксплуатации электрооборудования, включая и его приемку, сыграла весьма важную роль. Достаточно сказать, что даже в трудные годы войны, когда оборудование эксплуатировалось с перегрузкой, возросла протяженность временных сетей и в промышленность пришло много молодых, неопытных рабочих, удельные показатели, характеризующие электротравматизм, не увеличились.

Огромное значение для повышения электробезопасности в промышленности и энергосистемах имеют вышедшие в 1961 г. и обязательные для всех предприятий и ведомств «Правила технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок промышленных предприятий» и вышедшее в 1969 г. новое, переработанное издание «Правил технической эксплуатации электростанций и сетей».

Ознакомлению с мероприятиями по электробезопасности способствовали изданные большими тиражами книги В. И. Корольковой (1956 г.), Б. А. Князевского [29] и других, а также, что крайне важно, книги, освещающие специализированную направленность электробезопасности. К ним следует отнести книгу Г. С. Солодовникова [65]. Этому же способствуют публикуемые в ведущих электротехнических журналах материалы, в том числе и дискуссии по спорным вопросам. Регулярно (с 1959 г.) издается сборник научных трудов институтов охраны труда ВЦСПС, в котором большое место отводится исследованиям по электробезопасности, ведущимся во ВНИИ охраны труда ВЦСПС в Ленинграде. Значительно улучшились учет и расследование несчастных случаев после того, как отдел охраны труда ВЦСПС утвердил в 1959 и 1966 гг. соответствующие положения.

Накопленный опыт применения правил эксплуатации и безопасности показывает возможность их переработки и некоторого сокращения. Уменьшение объема информации, которую обязан знать эксплуатационный персонал, несомненно, приведет к более четкому выполнению действительно необходимых требований, а следовательно, снизит аварии и не-

счастливые случаи, относимые к категории «ошибок персонала», внесет большую ясность в оценки ответственности должностных лиц за нарушение правил приемки и эксплуатации электрооборудования. Возможность сокращения объема правил появилась в связи с нарастающим внедрением автоматизации в управление электрооборудованием и сетями.

2.2. Показатели электротравматизма и классификация электротравм

Коэффициенты, характеризующие травматизм. Целям учета и анализа травматизма служат следующие общепринятые и общераспространенные показатели:

а) коэффициент частоты — число несчастных случаев, пришедшихся за определенный период времени на 1000 работающих;

б) коэффициент тяжести — число дней потери трудоспособности, пришедшихся за определенный период времени на 1000 работающих;

в) коэффициент средней продолжительности одного случая нетрудоспособности, вызванной травмой (в днях).

Использование перечисленных коэффициентов помогает объективной оценке положения дел с травматизмом. Однако для более глубокого анализа причин несчастных случаев, а главное, для выявления очагов травм в отраслях народного хозяйства и непосредственно на предприятиях этих коэффициентов недостаточно.

Учет и анализ травматизма нуждаются в дальнейшей конкретизации показателей. Особенно большое значение эта конкретизация имеет теперь, когда возникла необходимость отделить предприятия и цехи с очагами травм от предприятий и цехов, где травматизм отсутствует, т. е. где травмы являются следствием чрезвычайных происшествий и, стало быть, относятся к категории несчастных случаев. Подсчитывать эти дополнительные коэффициенты следует по дифференцированным показателям, наиболее полно характеризующим особенности производственной деятельности данного предприятия или отрасли народного хозяйства (например, на 1 миллион киловатт-часов потребленной энергии, на 100 тысяч тонн выплавленной стали, на 1 миллион тонно-километров перевезенных грузов, на 1000 единиц обслуживаемого оборудования).

С 1952 г. ряд исследователей начинает использовать при анализе электротравматизма в крупных городах или в административных районах два дополнительных показателя: число поражений электрическим током на 1 миллиард киловатт-

часов потребленной энергии и на 1 миллион жителей. Необходимо отметить значительное снижение электротравматизма (об этом уже говорилось) по удельным показателям в Японии, Болгарии, ГДР и ряде других стран за счет повышения качества изоляции, изготавливаемого оборудования и большой ответственности за результаты работы.

Как видно из обзора [18, 19], число несчастных случаев, приходящихся на 1 миллиард киловатт-часов потребленной энергии, подсчитывается также в Бельгии, ФРГ и других странах. Эдисоновский электротехнический институт (США) пользуется, как сообщает бюллетень этого института, следующими показателями: относительной частотой несчастных случаев, определяемой как число их на 1 миллион отработанных человеко-часов, и относительной тяжестью последствий электротравматизма, определяемой как число рабочих часов, потерянных из-за электротравм, подсчитанное в расчете на 1 миллион отработанных человеко-часов. К сожалению, никаких данных о числе отработанных человеко-часов и о продолжительности рабочего дня бюллетень не приводит, вследствие чего показатели, применяемые Эдисоновским институтом, становятся в значительной степени условными.

Л. Д. Наумовский предложил учитывать число электротравм, приходящихся на одну сетевую подстанцию, и подсчитал этот показатель за ряд лет; он неизменно снижается.

Классификация электротравм. Все эти дополнительные коэффициенты, безусловно, полезны тем, что позволяют производить более полную и объективную оценку состояния электротравматизма и способствуют выявлению его очагов. Однако сами по себе они не обеспечат доброкачественности учета и анализа. Успех придет лишь тогда, когда дополнительные коэффициенты будут применяться на базе строго продуманной научной классификации электротравм. К сожалению, из всех видов физического поражения человека именно электрические поражения, как это ни странно, не имеют общепринятой классификации. В настоящей книге использована следующая классификация: а) поражения, приведшие к смертельному исходу; б) поражения, не приведшие к смерти, но вызвавшие потерю трудоспособности; в) поражения, не сопровождавшиеся потерей трудоспособности. Последние случаи будем в дальнейшем условно именовать электрическими ударами. Они имеют огромное значение при выявлении очагов электротравм.

Но эта классификация, учитывающая лишь исход травмы, не может, само собой разумеется, заменить классификации, которая учитывала бы характер общей реакции организма,

попавшего под напряжение. Отсутствие общепринятых показателей тяжести поражения (пусть даже выбранных условно) весьма затрудняет сопоставление выводов разных авторов. Попытка создать классификацию электротравм по их тяжести, как и сама постановка вопроса об этом, принадлежит Г. Л. Френкелю [75]. К сожалению, классификация, предложенная им, не нашла применения. Объяснить это можно прежде всего недостаточной полнотой тех расследований несчастных случаев, которые проводятся ныне в соответствии с действующими обязательными положениями.

2.3. Данные учета и их использование

Значение научно обоснованной методики расследования электротравм. Глубокий систематический анализ данных о поражениях, вызванных электрическим током, и об электротравматизме в целом призван способствовать выявлению очагов травм и разработке целенаправленных профилактических мероприятий. Анализ электротравм представляет собой одно из основных направлений эффективного повышения электробезопасности как в целых отраслях хозяйства, так и непосредственно на каждом предприятии в отдельности.

Из всех видов телесных повреждений электротравмы относятся к наиболее сложным, наиболее трудно поддающимся анализу. Следует отметить, что электротравмы по условиям возникновения и характеру действия электричества относятся к наиболее сложным травмам, уступая первенство по этим показателям травмам, вызываемым проникающим излучением, особенно при смешанном воздействии излучения и электричества. Расследование электротравм требует разносторонних знаний. Вот почему крайне необходима общая, научно обоснованная методика расследования электротравм и обработки данных их учета [81, 82].

Существующие нормативные указания упорядочили методику расследования. Важный вклад в это внес Всесоюзный научно-исследовательский институт охраны труда ВЦСПС (г. Ленинград), разработавший анкету, благодаря которой удалось данные, собранные по Союзу, быстро обрабатывать средствами современной вычислительной техники.

Наиболее полный анализ электротравматизма проведен в 1978 г. Он осуществлен одиннадцатью организациями, представляющими различные отрасли народного хозяйства. Головной организацией был Всесоюзный научно-исследовательский институт охраны труда ВЦСПС в Ленинграде. Анализ проводился по единой методической программе, им были

Неполнота данных, собираемых при расследовании электротравм. При всех достоинствах приведенной формы акта, а также других нормативных документов, обязательно составляемых при расследовании тяжелых случаев, они обладают одним весьма существенным недостатком: сведений, предусмотренных этими документами, недостаточно для глубокого изучения механизма действия электрического тока на организм человека. Считать такую неполноту этих документов случайностью, как видно, не приходится. Все дело состоит в довольно распространенном до сих пор мнении, будто необходимости в этих дополнительных данных не имеется, ибо можно моделировать электротравму в эксперименте на животных.

Несомненно, эксперименты на животных (а их произведено и производится немало) позволили многое выяснить, в результате чего удалось внести известные коррективы в разработку защитных мероприятий и в систему реанимации, особенно при доврачебной помощи. Но данные, получаемые в экспериментах на животных, крайне сложно экстраполировать на реальные условия электротравмы человека (что будет аргументировано далее в § 6.2—6.6). Такая экстраполяция является темой многолетних дискуссий в отношении правильности оценки опасных условий поражения.

Между тем глубокий анализ электротравм имеет важнейшее значение не только для выявления очагов электротравм, но и для корректировки наших представлений об опасности электричества по численным значениям поражающих факторов: напряжения, тока, времени существования электрической цепи и т. д. Крайне важно дальнейшее уточнение на большом и убедительном статистическом материале условий поражения малым напряжением, опасного времени существования электрической цепи и т. д. Однако в технической документации фиксируется напряжение электросети, в зоне действия которой произошла электротравма, но не определяется значение поражающего напряжения, хотя эти напряжения далеко не всегда совпадают.

Поражающее напряжение надо понимать как напряжение, возникшее в электрической цепи непосредственно на теле человека, т. е. с учетом, во-первых, падения напряжения на элементах сопротивления, оказавшихся в этой цепи (обувь, одежда, пол), и, во-вторых, нагрузки сети. Как правило, оно меньше, а иногда и много меньше напряжения электросети.

Отсутствие требований к установлению поражающих напряжений приводит к неправильным записям в актах расследования. К электротравмам (и притом даже с указанием напряжения и рода тока) относят травмы при падении людей

с высоты во время работы их на не находящихся под напряжением линиях электропередачи, различные механические травмы, вызванные нарушением работы электрооборудования, и т. п. И, наоборот, электрические удары, т. е. случаи поражения током, не вызывающие потери трудоспособности, вообще не регистрируются.

На этом обстоятельстве следует остановиться несколько подробнее. В § 1.3, говоря о промышленном травматизме вообще, мы указывали, что в СССР легкие травмы (речь шла о механических травмах), не приведшие к потере трудоспособности или же вызвавшие лишь краткую утрату ее, значительно преобладают над тяжелыми. Сделать такой вывод мы смогли, так как располагаем данными учета всех механических травм, как тяжелых, так и легких. К сожалению, так называемые легкие электротравмы, относящиеся к категории «электрический удар» или «удар током», выпадают из общей регистрации, хотя в иных случаях они, судя по отдаленным последствиям, наносят здоровью гораздо больший ущерб, чем порезы рук и ушибы, тоже относимые к легким травмам, но в отличие от легких электротравм подлежащие регистрации.

Значению легких электротравм (электрических ударов) начинают уделять внимание и за рубежом. Так, П. Осипка [109] пытался оценить число таких ударов. По его мнению, в среднем на одного электромонтера оно составляет 3—5 в год. В СССР оно достигает 7—10 ударов в год.

Регистрация легких механических травм целиком себя оправдала, так как способствует установлению тех или иных нарушений правил охраны труда и техники безопасности и сигнализирует о необходимости профилактических мер, направленных на предотвращение возможных осложнений (например, применение при порезах дезинфицирующих средств, предупреждающих занесение инфекции).

Столь же полезной, более того, необходимой надо считать регистрацию легких электротравм, даже не сопровождавшихся потерей трудоспособности. Такая регистрация способствовала бы, в частности, предоставлению лицам, пострадавшим от электрического удара, дополнительного отдыха или даже других, более активных средств укрепления общего состояния организма.

Как показывает опыт, регистрацию и учет легких травм, включая и электрические удары, не сопровождавшиеся потерей трудоспособности, целесообразно организовать в заводских пунктах медицинской помощи или в поликлиниках, обслуживающих районы расположения предприятий. При этом крайне важно фиксировать не только обстоятельства,

ского тока, но решение это осталось невыполненным. Спустя 25 лет, в 1935 г., С. Еллинек, анализируя электротравматизм, писал:

«Несмотря на то, что мое предложение (о вскрытии погибших от молнии и электрического тока) было единогласно принято, случаи вскрытия погибших от электричества крайне редки».

Серьезных изменений в этом отношении не произошло в зарубежных странах и в последующие периоды. Как показали еще в довоенные годы Клышко в Чехословакии и Т. Геберт в Германии, даже в тех случаях, когда судебно-медицинские вскрытия при внезапных смертях от электричества производились, результаты получались весьма скромными, поскольку обстоятельства несчастных случаев оставались, как правило, неизученными. При этом авторы перечисляют те ошибки и неправильные заключения, которые допускались при таком неполном обследовании.

В СССР погибших от электрического тока подвергают обязательному вскрытию. Основная цель вскрытия — установление причины смерти. Там, где время с момента смерти до судебно-медицинского вскрытия не превышает 8—10 ч, целесообразно проведение гистологического анализа мозгового вещества, чтобы помочь общему заключению судебно-медицинской экспертизы. При этом выясняется, соответствуют ли результаты вскрытия обстоятельствам происшествия. Но и здесь возможны ошибки.

Пример 2.1. Рабочие монтажного участка одного из строительных, придя на работу в понедельник утром, обнаружили лежащего на полу мастера цеха. Пальцы его рук касались поврежденного патрона переносной лампы, находившейся под напряжением 220 В. По показаниям рабочих, мастер задержался в субботу на работе, так как оформлял наряд. Судебно-медицинский эксперт написал, что смерть наступила от электрического тока, основываясь на том, что через тело пострадавшего длительное время протекал ток и на руках его были следы ожога. Однако прокуратура в процессе расследования установила убийство с корыстной целью и последующую инсценировку электротравмы. Повторное вскрытие показало, что пострадавший получил удар в голову, от которого и умер. Что касается электрометок, то, как выявило более внимательное рассмотрение, они возникли после смерти.

Пример 2.2. В отделение милиции южного курортного города обратилась жена электромонтера городской сети с просьбой о розыске ее мужа, не вернувшегося домой после работы. Расспросы сослуживцев, родных и знакомых ничего не дали. Через десять дней после начала розыска контролер энергонadzора записывал показания счетчика на одной из подстанций без дежурного персонала, находя-

шейся на окраине города, и почувствовал трупный запах, доносившийся из помещения высоковольтного трансформатора. Прибывшие на подстанцию по вызову контролера начальник участка сети и следователь прокуратуры обнаружили в трансформаторном помещении труп разыскиваемого электромонтера. Погибший лежал, касаясь корпуса работавшего трансформатора, под шинами, находившимися под напряжением 10 кВ. Погода стояла жаркая, и непосредственно у места расположения трупа температура воздуха была особенно высокой. Труп находился в состоянии разложения — разбухший, посеревший. Помещение оказалось незапертым, ключ от него обнаружился в кармане погибшего. Возникла версия, что электромонтер, находившийся в состоянии алкогольного опьянения (последнее обстоятельство было подтверждено актом судебно-медицинского вскрытия), отпер помещение и попал под напряжение.

Заключение судебно-медицинского эксперта, оправданное обстановкой происшествия, мнением технической экспертизы и состоянием трупа, гласило: «Электротравма, вызванная напряжением 10 кВ». Однако дело не было закрыто, так как судебного эксперта и следователя насторожил ряд обстоятельств. Начать с того, что на теле погибшего не было электрометок. Правда, это могло объясняться сильным разложением кожи трупа. Но не было и следов дуги на шинах и на корпусе трансформатора. В журнале дежурного диспетчера среди записей, относящихся к предполагаемому времени гибели монтера, не был зафиксирован сигнал «земля», хотя при данной версии происшествия он должен был бы быть (сеть 10 кВ с незаземленной нейтралью, смешанная — кабельная и воздушная, расположение тела — параллельно корпусу трансформатора). И, наконец, обнаружилось, что замок помещения был взломан, а ведь погибшему его взламывать было ни к чему, поскольку в кармане у него лежал ключ. Так родилась новая версия — убийство. Она нашла подтверждение после произведенной эксгумации трупа — обнаружилось смещение шейных позвонков, вызванное ударом трубы по шее.

Случаи, когда убийство имитируется электротравмой, редки, но они имеют место, и об этом надо помнить, ведя расследование причин несчастных случаев. Одному лишь судебно-медицинскому эксперту, имеющему дело с трупом, установить истинную причину смерти бывает трудно.

Пример 2.3. Женщина спала с полуторагодовалым ребенком в двуспальной кровати. Под утро она проснулась и вышла из комнаты. Вернувшись, она, по ее словам, нашла ребенка мертвым. Рядом с его ручонкой лежала шпилька с отчетливо видимыми оплавлениями на концах, на руке ребенка обнаружались следы покраснения. Оплавления были обнаружены и у контактов штепсельной розетки, имевшейся в изголовье кровати. Казалось очевидным: пробудившись, ребенок взял шпильку, вставил ее в отверстие розетки и погиб.

Несмотря на внешнюю убедительность этой версии, следователь и эксперт не приняли ее. Их смутили два привходящих обстоятельства. Во-первых, мать погибшего ребенка незадолго до происшествия

была брошена мужем и, как не раз слышали соседи, угрожала ему, если он не вернется в семью, убить ребенка. Во-вторых, она была по образованию инженером-электриком. Видимо, находясь в состоянии сильнейшей душевной депрессии, вызванной изменой любимого человека, она осуществила свою угрозу — задушила ребенка подушкой, а затем, боясь ответственности за содеянное, с полным знанием дела имитировала несчастный случай от электричества. Когда следователь в беседе с ней сказал о своих подозрениях и расказал о предположительных обстоятельствах происшествия, она, словно снимая с себя страшную тяжесть, сразу призналась в убийстве.

Диагностическое значение электрометок. Основным признаком поражения человека электрическим током являются электрометки — следы тока на коже пострадавшего в местах ее контакта с частями электрооборудования или проводами, находившимися в момент происшествия под напряжением. В прошлом при отсутствии таких следов судебно-медицинский эксперт выносил заключение о причине смерти главным образом на основе обстоятельств дела, данных следствия и технической экспертизы. В рассмотренном нами примере 2.1 контакт погибшего с токоведущими частями, находившимися под напряжением, был налицо, имелись и следы тока. Мало того, опрос очевидцев происшествия показал, что тело погибшего находилось в электрической цепи не менее 30—36 ч. Формальных оснований для сделанного заключения было вполне достаточно. Однако они привели к ложным выводам, которых могло бы и не быть, если бы судебно-медицинский эксперт не поддавался гипнозу очевидных обстоятельств, а детальным образом обследовал бы тело погибшего. Обнаружив след от удара в голову, он, несомненно, пришел бы к выводу о необходимости более обстоятельного осмотра электрометок и выявил бы их посмертное происхождение.

Электрометки на теле человека достаточно подробно изучены. Установлено, что электрометки, возникшие в результате прижизненного соприкосновения человека с токоведущими частями, существенно отличаются от электрометок, возникших на теле, если подобное соприкосновение произошло после смерти. Для случая прижизненного соприкосновения характерна краснота вокруг места касания. В случае точечного касания электрометка напоминает пчелиный укус с точкой в середине и некоторой отечностью. Иногда краснота, представляющая собой разновидность воспалительного процесса, появляется через 3—5 мин после травмы. На теле живого человека электрометка может возникнуть при очень малом токе, на трупе же след появляется лишь при плотности тока 0,5—1,0 А/см² даже при кратковременном воздействии тока.

Ошибка судебно-медицинского эксперта, описанная в примере 2.1, была выявлена с большим опозданием — лишь по фотографии электрометок, сделанной представителем технической инспекции. Именно эта фотография, а также результаты расследования, проведенного прокуратурой, привели к решению о необходимости повторного вскрытия.

Один из двух монтеров, работавших вместе с погибшим, прослышав о повторном вскрытии, скрылся. Суд над вторым монтером был вынужден ограничиться приговором за соучастие в убийстве, ибо кто именно из них двоих убил мастера, следствию установить не удалось.

Изменения в селезенке. Насущная необходимость в объективном методе определения причин смерти при отсутствии электрометок на теле (а число таких электротравм достигает 30 %) привела к проведению большого числа исследований. Как будет показано в главах шестой и восьмой, наиболее информативные изменения в организме человека при электротравме происходят в центральной нервной системе. Однако обнаружить их при патологоанатомическом вскрытии тела пострадавшего не представляется возможным, ибо выраженными они бывают лишь в первые два часа после смерти, вслед за чем происходит деструкция ткани и обнаружить их не удастся даже весьма опытным нейрогистологам. Поэтому заслуживает рассмотрения объективный метод диагностики смерти от электрического тока, предложенный Э. С. Егизаряном. Он обратил внимание на то, что в актах судебно-медицинской экспертизы погибших от электротравм обычно фиксируют полнокровие внутренних органов и четкую общую асфиксию (удушье), свидетельствующие о первичном нарушении функции дыхания. Наблюдениям же за состоянием селезенки, как правило, не придают значения, хотя роль ее в жизни человека огромна.

Об острой реакции селезенки на различные виды раздражителей впервые писал Ф. Ф. Сысоев еще в 1928 г. Он и последующие исследователи показали, что любая патология в организме вызывает те или иные изменения в селезенке. Э. С. Егизарян, располагая современными морфологическими, спектрографическими и спектрофотометрическими методами исследования, сумел показать [42] ее роль в реакции на такой раздражитель, как электрический ток. Он исследовал 20 случаев гибели людей от электрического тока в бытовых условиях, т. е. при напряжении электросети 127 и 220 В. Контролем служили трупы лиц, умерших от инфаркта миокарда, спазма мозговых сосудов, травмы головы, ножевого ранения, огнестрельного поражения сердца. Одновременно Э. С. Еги-

зариян провел исследования на большой группе животных (белые крысы).

Установлено, что в случае смертельного поражения переменным электрическим током промышленной частоты возникает отек артерии красной пульпы селезенки, наблюдаются полнокровие ее сосудов, очаговые кровоизлияния и атрофия лимфоидных фолликулов белой пульпы, а стенки артерий белой пульпы подвергаются явно выраженной специфической деструкции. Спектрофотометрия показывает, что при поражении переменным электрическим током концентрация калия в тканях селезенки повышается, а натрия — снижается. Спектрография определяет существенные изменения в соотношениях макро- и микроэлементов в тканях селезенки: содержание алюминия, железа, магния и фосфора увеличивается, а кремния — уменьшается. Это позволило установить, какие именно количественные соотношения калия и натрия, кальция и фосфора, железа и кальция, железа и алюминия, алюминия и кремния характеризуют смерть от электротравмы.

А это означает, что судебно-медицинский эксперт располагает теперь достаточно точным и объективным приборным методом диагностики, особенно важным при оценке бытовых электротравм и травм в промышленности при напряжении ниже 65—127 В, когда во многих случаях отсутствуют электрометки. Широкое использование этого метода открывает большие перспективы и для исследователя, интересующегося взаимодействием электрического тока с живым организмом.

Усовершенствование системы расследования смертей от электричества. Спектрофотографические и спектрофотометрические исследования, о которых говорилось выше, требуют довольно сложного и не всем доступного оборудования. Повидимому, целесообразно в каждом крупном промышленном городе создать централизованную экспресс-лабораторию, оснастить ее современным физическим, биохимическим и биофизическим экспериментальным оборудованием и сосредоточить в ней судебно-медицинскую экспертизу случаев острой смерти. Такие базовые лаборатории, несомненно, сыграют большую роль в изучении механизма сложных физических воздействий на человека, к каковым по праву следует отнести и поражение электрическим током.

Наличие таких лабораторий придаст выводам судебно-медицинской экспертизы большую значимость. В настоящее время, если судебно-медицинские вскрытия и выясняют причину смерти, то они, как правило, дают очень мало материала, необходимого для более подробного расследования несчастных случаев, в частности для определения значений

параметров электрической цепи, вызвавших тяжелый исход. Изобилие в акте вскрытия обязательных сведений общего порядка подчас лишает инженера, который ведет расследование, возможности использовать данные вскрытия в целях более подробного выяснения значений параметров электрической цепи, приведших к смерти. Вследствие этого при расследовании допускаются ошибки в определении параметров токоведущих частей, соприкосновение с которыми вызвало образование смертельной для человека электрической цепи. И в этом плане необходимость усовершенствования системы и практики расследования смертельных поражений от электричества совершенно очевидна.

2.5 Характеристика электротравматизма в капиталистических странах

Прежде чем приступить к изложению данных об электротравматизме за рубежом, следует предостеречь читателя от прямого, некритичного сопоставления их с аналогичными данными по нашей стране. Дело в том, что у нас в отличие от подавляющего большинства капиталистических стран существует обязательная система регистрации и учета несчастных случаев, в том числе и электротравм. Правда, в некоторых отраслях народного хозяйства, в частности на коммунальных предприятиях и в сельском хозяйстве, встречаются нарушения этой системы. Плохо учитываются несчастные случаи от электричества и в быту, особенно если они происходят в небольших городах и в сельских районах. Но в тяжелых случаях, когда приходится прибегать к судебно-медицинским вскрытиям и прокурорским расследованиям, все эти недостатки учета выявляются. Поэтому имеются основания утверждать, что в СССР электротравмы учитываются и расследуются с наибольшей в мире полнотой. А это служит залогом успеха в борьбе с электротравматизмом, ибо таким путем выявляются очаги электротравм, что позволяет выработать как общие, так и частные мероприятия по предупреждению несчастных случаев.

Сравнение статистических данных по электротравматизму в СССР с соответствующими данными в капиталистических странах, в которых единая обязательная система такого учета отсутствует, ставит Советский Союз, естественно, в менее благоприятные условия. Но сравнение, осуществляемое с необходимыми поправками, весьма поучительно, поскольку оно, помимо всего прочего, характеризует и отношение к охране труда в социалистическом государстве.

Сколько-нибудь исчерпывающие статистические обзоры электротравматизма по отдельным зарубежным странам долгое время отсутствовали, что вынуждало обращаться к работам С. Еллинека [22], имеющим более чем полувековую давность. Лишь с 1956 г. в специальной литературе начали появляться работы, характеризующие производственный электротравматизм за рубежом. Опубликованы материалы по электротравматизму в США, Австрии, Англии, ФРГ, Бельгии, Японии, Болгарии, ГДР и других странах [86, 89, 92, 108, 110, 113]. Приведем данные второй половины 80-х годов.

Обзоры, публикуемые в настоящее время за рубежом, дают главным образом общее представление о несчастных случаях в той или иной отрасли народного хозяйства данной страны. Наибольший интерес вызывают систематически публикуемые отчеты Эдисоновского электротехнического института (США) и Фабрично-заводской инспекции в Англии. Весьма обстоятельные обзоры помещает на своих страницах Швейцарский электротехнический бюллетень [98].

Даже беглое ознакомление с этими данными показывает, что отсутствие единого подхода к учету, оценке и статистической обработке электротравм приводит к большому разнообразию в выводах. В статистических обзорах, опубликованных в зарубежной литературе, отсутствуют сведения о правилах учета несчастных случаев, принятых в тех или иных странах. Если сопоставить число тяжелых электротравм в странах, не отличающихся друг от друга по энерговооруженности и характеру производства, то получаются столь значительные расхождения, что объяснить их можно только различиями в системах учета.

И все же на основе этих данных можно сделать следующие выводы. В капиталистических странах Австрии, США, ФРГ, Швейцарии и Японии в послевоенные годы значительно возрос электротравматизм. В последующие годы наблюдалась некоторая стабилизация числа несчастных случаев. А начиная с 70-х годов электротравматизм в этих странах резко уменьшился. Так, например, по данным журнала *Elektrotechn. und Informationst.* (1988, т. 105, № 3), в ФРГ зарегистрировано 218 несчастных случаев за 1987 г. (табл. 2.1). За период с 1980 по 1987 г. число смертельно пораженных электрическим током находится в пределах 20—30 человек за год, что значительно меньше, чем в других странах. В указанной публикации отмечается как положительный фактор снижение общей численности электротравм в промышленности и быту, однако в то же время

Таблица 2.1. Обобщенная статистика поражений людей электрическим током в ФРГ за 1984—1987 гг.*

Год	Число несчастных случаев с тяжелым исходом	Место работы		Распределение электротравм по напряжению сети или электрооборудования				
		внутри помещения	снаружи	Выше 100 кВ	1—99 кВ	250—999 В	42—250 В	Ниже 42 В
1984	271	201	70	2	45	23	191	10
1985	282	184	98	5	66	21	175	5
1986	275	189	86	2	58	15	203	7
1987	218	147	71	1	50	67	150	3

* В других европейских странах, а также в СССР число электротравм с тяжелым исходом значительно больше.

указывается, что из общего числа несчастных случаев в промышленности поражение электрическим током наносит максимальный ущерб. В оценку материального ущерба входит стоимость подготовки работника, занявшего место погибшего. Там же впервые приводятся случаи поражения электрическим током малого напряжения (42 В). Максимальное число пораженных приходится на установки и сети напряжением до 1000 В. Стоит отметить, что в данной публикации указывается на возможность отдаленных последствий электротравм, не сопровождающихся смертельным исходом.

В Японии, по данным журнала «Дэнки Керон» (1988, т. 73, № 5), в 1986 г. зарегистрировано 246 891 случай поражения электрическим током, из них 2318 было смертельных.

Ознакомление с данными по электротравматизму в США за последние годы, вплоть до 1990 г., показывает, что число смертельных поражений от электричества в США достигает 1100—1200 в год. Такие меры, направленные на уменьшение числа электротравм, как повышение надежности электроснабжения и улучшение качества изоляции оборудования, не гарантируют от поражений электричеством из-за ошибок персонала, связанных с употреблением наркотиков. Увеличение электротравм по этой причине наблюдается и в других странах.

Утверждение о том, что численные данные об электротравматизме в капиталистических странах существенно ограничены неполнотой учета, меньше всего относится в Австрии, где С. Еллинек наладил образцовый учет электротравм, а также подробное и обстоятельное расследование несчаст-

ных случаев при обязательном судебно-медицинском вскрытии погибших. Австрия, пожалуй, единственная капиталистическая страна, в которой существует обязательное вскрытие погибших от удара молний или от поражения электрическим током. В Австрии, по данным, приведенным в сборнике «Электротравматизм в зарубежных странах» (Московский институт нефти и газа. М., 1988), число поражений электрическим током со смертельным исходом за последнее десятилетие в отдельные годы не превышало одного случая на 1 миллион жителей.

В каждой стране динамика электротравматизма обладает спецификой, определяемой различными причинами: характером потребителей, типом прокладки сетей, их напряжением и даже климатом. Например, в Швейцарии значительно выше, чем в других европейских странах, удельный вес поражений в сетях напряжением ниже 1000 В (90 % вместо 80—83 %). Это обстоятельство объясняется, по-видимому, тем, что в Швейцарии относительно невелика протяженность сетей напряжением выше 1000 В, а число электроприемников, приходящихся на 1 миллион жителей, весьма велико. Характерно для Швейцарии (и это пока не находит объяснения) значительное число случаев поражения с длительной потерей трудоспособности, происшедших на установках и в сетях напряжением ниже 1000 В. Достаточно сказать, что в 1959 г. число потерянных по этой причине рабочих дней возросло по сравнению с 1956 г. на 15 %. Коэффициент тяжести поражений в этой стране значительно выше, чем в других странах. Несколько увеличилось в Швейцарии число несчастных случаев при электросварочных работах и на крановых установках [89].

Представляет интерес отношение общего числа электротравм к числу их со смертельным исходом. Среднее значение этого показателя по капиталистическим странам можно считать равным 13,8 при колебаниях от 7,1 до 19,9. По данным Швейцарского электротехнического бюллетеня [51], этот показатель достигает даже 22,3.

Во Франции на 1 миллион жителей в 1965 г. приходилось 4,6 и на 1 миллиард киловатт-часов потребленной энергии — 9,4 травмы со смертельным исходом. В связи с этим представляет интерес обзор электротравматизма по энергосистеме «Электрисите де Франс». В нем показывается, что за десять лет (1971—1981 гг.) произошло 1532 несчастных случая, из них 451 (или 34,8 %) со смертельным исходом. 24,4 % от общего числа несчастных случаев произошло в абонентских сетях, в том числе 108 случаев связаны с использованием быто-

выми электрическими приборами (22,4 % приходится на стиральные машины, 18,4 % — на домашний ремонт телевизоров и радиоприемников, 5,2 % — на электроутюги, 17,1 % — на электрические осветительные приборы, 4,2 % — на пылесосы, остальные 32,7 % — на нетиповые приборы).

Если судить по отдельным публикациям в печати, эти данные довольно точно характеризуют электротравматизм и в других европейских странах. Отсюда вытекает, что значительное увеличение бытовых электрических приборов приводит к увеличению электротравм, что можно объяснить отсутствием широкой кампании по разъяснению недопустимости ремонта электрических бытовых приборов неспециалистами, несовершенным качеством изоляции этих приборов и недостаточным вниманием к состоянию электрических бытовых сетей.

Неблагополучно с электротравматизмом и на электрических станциях Франции. Об этом свидетельствуют, в частности, следующие данные. На 1000 рабочих, занятых в энергосистемах, приходится за год 1 смертельный, 15 тяжелых и 100 легких несчастных случаев. Все это привело к созданию в энергосистеме «Электрисите де Франс» специального отдела по охране труда. По данным французских источников, электротравматизм среди иностранцев, приехавших на работу во Францию, значительно выше, чем среди рабочих из числа коренного населения.

Имеющиеся данные позволяют оценить в первом приближении годовое число смертей от электрического тока, происходящих в капиталистических странах. Ц. Симон [112] считает, что в капиталистических странах Европы на 1 миллион жителей приходится 4—10, а в среднем 5,2 смертельной электротравмы в год.

Энерговооруженность развивающихся стран Азии и Африки, конечно, меньше, но зато и культура эксплуатации электрооборудования там ниже. Достаточно сказать, что только за два года (1969 и 1970) в Западной Бенгалии (Индия) было зарегистрировано 190 смертельных травм от электричества [113]. Поэтому можно принять, что среднее годовое число электротравм с летальным исходом на 1 миллион жителей Азии и Африки составляет 6,3, т. е. несколько больше, чем в европейских странах. Отсюда следует, что в этих странах, население которых превышает 3 миллиарда человек, от электрического тока в год погибает 25—30 тысяч человек.

2.6. Характеристика электротравматизма в СССР

Действенные средства борьбы с травматизмом. Нетрудно доказать, что электротравматизм, как и травматизм в целом, может возникнуть и просуществовать какое-то время лишь как явление, подлежащее и поддающееся устранению, во всяком случае, снижению по абсолютным и относительным показателям, что доказывается отсутствием электротравматизма не только на многих тысячах промышленных предприятий СССР, но и в целых отраслях народного хозяйства. Сказанное не исключает, однако, возможности возникновения даже на этих, казалось бы, благополучных участках отдельных электротравм, вызванных стечением неблагоприятно сложившихся обстоятельств, или несчастными случаями, или грубым нарушением дисциплины.

Государственный надзор за эксплуатацией оборудования, профсоюзный контроль за проведением и обязательным внедрением мероприятий по охране труда, большое внимание, уделяемое общественностью решению проблемы охраны труда и техники безопасности, наконец, советское трудовое законодательство являются действенными средствами борьбы с травматизмом.

Закон предусматривает уголовное наказание лиц, не обеспечивающих предусмотренных защитных мероприятий, даже в том случае, если их отсутствие лишь могло привести (хотя и не привело) к производственной травме. Подробнее об этом см. в главе шестнадцатой.

Публичное обсуждение проблемы. Примером проявления большого интереса общественности нашей страны к проблеме электробезопасности может служить публикация многочисленных описаний несчастных случаев, вызванных электричеством, в технических журналах. Дело не ограничивается помещением соответствующих материалов в специальном журнале «Охрана труда и техника безопасности». Практически все журналы электротехнического профиля, начиная со старейшего журнала «Электричество», периодически публикуют описания несчастных случаев и статьи, посвященные разработке защитных мероприятий.

Первая более или менее полная сводка данных по электротравмам в нашей стране была сделана Н. А. Вигдорчиком [12]. Большой статистический материал привели в своих работах В. И. Королькова, а также М. А. Аврущенко и Н. З. Хавин и др. Авторы последней работы проанализировали производственные электротравмы в энергосистемах и пришли к выводу, что многие несчастные случаи происходят

вследствие грубых нарушений правил технической эксплуатации и требований безопасности, а также элементарной трудовой дисциплины.

Пример 2.4. Приведем случай грубейшего нарушения трудовой дисциплины. Один из сотрудников электросистемы хранил свой велосипед в рабочее время в помещении действующего трансформатора, находящегося вблизи его места работы, используя сделанный им дублирующий ключ от помещения. Кроме велосипеда, там же он хранил и некоторые домашние вещи.

В результате неосторожных действий произошло замыкание токоведущих частей. Возникла искра. Сотрудник пострадал, пострадала вещь. К счастью, травма ограничилась ожогом лица. За такое нарушение виновник получил наказание в виде выговора, так как были учтены его производственный стаж и безупречная работа. К сожалению, подобные возмутительные случаи иногда повторяются.

В организацию эксплуатации электрической части станций и сетевых подстанций были внесены существенные коррективы, а приведенные М. А. Аврущенко и Н. З. Хавиным обстоятельные описания несчастных случаев до последнего времени используются в системе обучения дежурного персонала энергосистемы.

Обобщение и анализ материалов по электротравматизму. В СССР имеются огромные возможности для глубокого и разностороннего анализа несчастных случаев. Данные исследований, проводимых инспекторами энергонадзора, рассматриваются и обобщаются техническими инспекциями обкомов, а затем и отделами охраны труда отраслевых профсоюзов. Каждую травму с тяжелым исходом тщательно расследуют органы судебно-медицинской экспертизы. Данные этой экспертизы содержат сведения об электротравмах, происшедших не только в промышленности и на транспорте, но и в быту, на коммунальных предприятиях, в сельском хозяйстве и т. д.

По нашим подсчетам, число смертельных электротравм, учтенных судебно-медицинской экспертизой, на 40 % превышает число их, расследованных всеми видами инспекций. Поэтому Министерство здравоохранения СССР обладает всеми возможностями для оценки проблемы электротравматизма в целом по стране.

В начале 60-х годов начал проводиться систематический анализ электротравматизма ВНИИ охраны труда ВЦСПС в Ленинграде (ЛИОТ). Наибольшее внимание привлекает здесь насыщенное конкретными материалами исследование электротравматизма за 50—60-е годы [18]. С одним из утвер-

ждений авторов этого исследования, что «темпы повышения электробезопасности в народном хозяйстве нельзя признать удовлетворительными, поскольку электротравматизм в пересчете на 1 миллион работающих за указанные годы вырос в 1,2 раза», нельзя полностью согласиться. За минувшие годы в народном хозяйстве страны произошли серьезные изменения. Ежегодный прирост производства электроэнергии составил 7—8 %, электропотребление в общем возросло за это время более чем в 2,5 раза. Протяженность электрических сетей увеличилась более чем в 3 раза. Электровооруженность трудящегося, занятого в промышленности и на транспорте, поднялась более чем в 2 раза, а в сельском хозяйстве — почти в 10 раз. В несколько раз увеличилось число бытовых электроприемников на каждого жителя [48]. Поэтому о «темпах повышения электробезопасности» правильнее судить по числу электротравм, приходящихся на 1 миллиард киловатт-часов электроэнергии, отпущенной потребителям. А этот главный показатель электротравматизма по сравнению с 1961 г. снизился, по нашим данным, почти в 3 раза. В ряде промышленных районов (Московский, Ленинградский, Латвийский и др.) на 1 миллиард киловатт-часов потребленной энергии приходится немного более одной электротравмы с тяжелым исходом. Так, например, число электротравм по системе Ленэнерго, объединяющей Ленинградскую, Новгородскую и Псковскую области, составляло в 1985 г. на 1 миллиард киловатт-часов 2,5, а в 1988 г. — всего 1,8. Примерно так же обстояли дела в Мосэнерго. В США этот показатель составлял в 1988 г. 1,4. Вот эти цифры более объективно характеризуют ведущуюся в нашей стране работу по повышению электробезопасности.

Централизованное электроснабжение получили практически все промышленные и непромышленные предприятия, все города и села, все дома и квартиры. Число лиц, профессионально обслуживающих электротехнические устройства и электрорадиооборудование, ежегодно увеличивается на сотни тысяч человек. А все это — залог электробезопасности в условиях бурно растущего электропотребления.

Электротравматизм в отдельных отраслях народного хозяйства. Много лет под руководством В. И. Филиппова и Г. Ю. Гордон анализируется электротравматизм на производстве [18]. Распределение производственных электротравм по отраслям народного хозяйства СССР показано в табл. 2.2.

Заметим, что пользоваться данными этой таблицы надо с осторожностью. Удельный вес каждой из отраслей в на-

**Таблица 2.2. Распределение (в процентах к итогу)
производственных электротравм по отраслям народного хозяйства**

Отрасль	Годы			
	1951— 1952	1964— 1966	1964— 1966**	1985— 1987
Сельское хозяйство	6,6	27,7	8,9	31,4
Электростанции, электротехническая и радиоэлектронная промышленность	8,9	15,6	30,5	8,3
Строительство и промышленность строительных материалов	10,9	11,7	7,4	16,4
Железнодорожный транспорт (без транспортного строительства)	7,9	5,1	12	4
Машиностроение и судостроение	6,1	4,7	18,8	1,2
Пищевая промышленность	*	4,5	—	4,4
Коммунально-бытовые предприятия	3,8	4,3	15	8,5
Металлургическая промышленность	8	4	8,2	2
Государственная торговля и потребительская кооперация	*	3,7	17,5	3,4
Нефтяная и химическая промышленность	7,8	3,6	13,8	3
Предприятия связи, автотранспорта и шоссейных дорог	3,5	3,5	8,6	3
Лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность	2,1	2,9	3,7	3
Угольная промышленность	17,1	2,8	1,7	4,7
Текстильная и легкая промышленность	*	2	20,5	2,1
Геологоразведка	*	1	6,4	0,5
Морской и речной флот	2,4	0,8	—	0,6
Гражданская авиация	*	0,2	8,3	0,3
Прочие отрасли (государственные, культурно-просветительные, медицинские и научные учреждения, учебные заведения)	14,9	1,9	14,6	3,2
Итого:	100	100	12,2	100

* Из-за отсутствия сопоставимых данных отнесены к «Прочим отраслям».

** Цифры в этой графе показывают процент травм со смертельным исходом к общему числу травм в данной отрасли, а в строке «Итого» — в народном хозяйстве в целом.

родном хозяйстве страны не остается неизменным, и уже это одно могло повлиять на приведенное в таблице распределение электротравм. Тем не менее, исходным материалом для размышления таблица, конечно, может служить.

Ощутимы достижения в борьбе с электротравматизмом многих ведущих отраслей промышленности. Общеизвестным фактом являются опережающие темпы развития машиностроения в нашей стране. В этих условиях можно было ожидать увеличения удельного веса машиностроения в общем производственном электротравматизме. И то, что этого не произошло, имеет свое объяснение: в машиностроении (включая судостроение, станкостроение, электромашиностроение, приборостроение и тяжелое машиностроение), равно как и в металлургии, в энергетике и в некоторых других отраслях промышленности, очаги электротравм уже начинают исчезать. Крайне редкие электротравмы, еще встречающиеся там, нетипичны, хотя и они требуют тщательного расследования всех обстоятельств происшествия, чтобы избежать новых несчастий.

Очаги электротравм исчезают, как правило, там, где надежности оборудования уделяется большое внимание, строго соблюдаются требования по устройству и эксплуатации оборудования, проводится систематическая профилактика, применяются жесткие меры к нарушителям трудовой дисциплины. В этих отраслях промышленности внимание направляется на состояние вводимого в эксплуатацию нового технологического оборудования, на организацию эксплуатации оборудования, имеющего системы, находящиеся под напряжением, словом, на все, что должно обеспечивать безопасность работы.

Но в отдельных (в первую очередь новых) промышленных районах, в которых велик объем строительных и монтажных работ и где основное производство находится еще в процессе освоения, число электротравм продолжает оставаться большим.

В строительстве электротравматизм существует в его классической форме. Подчеркнем, именно в классической, ибо тут совершенно очевидны его причины и ясны пути устранения, которые в нашем государстве вполне реализуемы. Высокий травматизм на строительных площадках объясняется прежде всего трудностями эксплуатации электротехнических устройств на открытом воздухе. О значении этого фактора говорит хотя бы распределение всех электротравм, зарегистрированных за ряд последних лет в нашей стране, по месту их возникновения: 47,4 % их произошли в помещениях, а 52,6 % — вне помещений [26]. Не вызывает сомнений необходимость замены воздушных линий электропередачи кабельными. Однако темпы осуществления этого мероприятия на строительстве явно недостаточны.

В начале 50-х годов горнодобывающая промышленность находилась по уровню электротравматизма на первом месте, опережая даже строительство. Осуществленные за последние годы мероприятия снизили электротравматизм в горнодобывающей промышленности, и сейчас она уже не столь сильно выделяется в этом отношении среди других отраслей народного хозяйства. Угледобыча, в значительной мере определяющая лицо всей горнодобывающей промышленности, снизила, например, свою долю в общем производственном электротравматизме почти в 4 раза (с 17,1 % в 1951—1952 гг. до 4,8 % в 1978—1988 гг.). Объясняется это повышением требовательности органов энергонадзора, использованием автоматики в эксплуатации технологического оборудования, повышением качества изготовления электротехнических аппаратов, изделий, двигателей и внедрением организационных мероприятий по охране труда.

Важнейшим из мероприятий, обеспечивших снижение числа подземных электротравм, является переустройство контактных сетей рудничных электровозов. Прикосновения к троллейным проводам, подвешенным на высоте всего 2—2,5 м (а такие прикосновения могут быть как непосредственными, так и через тот или иной инструмент, трубу и т. д.), нередко приводили к смертельным поражениям. Применение посекционного автоматического снятия напряжения (иными словами, подача напряжения только на тот участок сети, на котором находится в данный момент электровоз) привело к существенному сокращению числа электротравм. Используемая для этих целей защита РУКС-2м должна найти самое широкое применение.

Но есть и такие отрасли народного хозяйства, в которых электротравматизм не только превышает соответствующий показатель по Союзу в целом, но и увеличивается год от года. Если в 1951—1952 гг. на долю сельского хозяйства приходилось 6,6 % общего числа производственных электротравм в стране, то в 1978—1980 гг. соответствующая цифра достигла уже 16,2 %. Практически четверть всех производственных электротравм происходит в сельском хозяйстве, хотя его энергоустановки потребляют лишь 6—8 % производимой в стране электрической энергии [45]. Об этом же говорят и более подробные данные А. И. Якобса [83].

В этом отношении показателен пример одного из наиболее крупных промышленных районов страны с ежегодным потреблением свыше 20 миллиардов киловатт-часов электроэнергии. Сельское хозяйство в этом районе развито слабо. Достаточно сказать, что оно не обеспечивает городского

населения даже овощами. И вот на это маломощное сельское хозяйство, потребляющее менее 3 % всей электроэнергии, расходуемой районом, приходится свыше 50 % всех зарегистрированных там электротравм с летальным исходом.

При эксплуатации электрооборудования и электрических сетей в сельском хозяйстве чаще, чем в промышленности, встречаются нарушения правил эксплуатации и техники безопасности, в частности, из-за нехватки квалифицированных работников и допуска к работе людей в нетрезвом состоянии. Но это — явление временное, пути устранения перечисленных недостатков ясны, и можно не сомневаться, что электротравматизм на селе будет уже в ближайшие годы резко снижен, особенно при переходе на агропромышленные комплексы.

Заметим, что в сельском хозяйстве капиталистических стран тоже неблагополучно с электробезопасностью. Даже в такой промышленно развитой стране, как Австрия, число смертельных поражений в сельском хозяйстве достигает 40 % от общего числа электротравм с тяжелым исходом. Высок также электротравматизм в сельском хозяйстве США и других странах. В Англии электротравмы в садоводстве даже выделяются в отдельную группу.

Несчастные случаи со смертельным исходом имели место на электромедицинских установках в поликлиниках и больницах (при ремонте физиотерапевтической и рентгеновской аппаратуры), в рекламных организациях (при установке световых вывесок) и т. д. Между тем электрооборудование напряжением выше 1000 В вполне можно эксплуатировать безопасно, о чем свидетельствует опыт электросвязи. На предприятиях электросвязи СССР используется много оборудования напряжением выше 1000 В, к тому же нередко установленного на открытом воздухе иля в неприиспособленных помещениях. И все же здесь на протяжении отдельных лет вовсе не наблюдалось смертельных поражений, связанных с работой на этом оборудовании.

Растет число электротравм и в быту, главным образом в сетях старого жилого фонда.

Распределение электротравм по отраслям народного хозяйства показывает, что они преобладают там, где имеется много сетей временного электроснабжения и воздушных сетей напряжением ниже 1000 В. Именно такое положение складывается на предприятиях по добыче полезных ископаемых и на строительных площадках, нуждающихся в специализированном электрооборудовании и в специализированных электрических сетях, но зачастую не имеющих их.

Дальнейшие успехи в обеспечении электробезопасности зависят от темпов: а) механизации и автоматизации производственных процессов; б) внедрения робототехники; в) замены воздушных линий электропередачи кабельными; г) повышения качества электроизоляционных материалов; д) освоения строительных материалов, деталей и конструкций с улучшенными электроизоляционными параметрами; е) увеличения надежности электроснабжения; ж) улучшения микроклимата внутри производственных помещений, поскольку отклонение его от нормы часто повышает электробезопасность (см. § 9.7). Крайне настораживает рост электротравм при капитальных ремонтах старого жилого фонда. За последние 10 лет число их возросло почти в два раза. Работы по всем этим направлениям ведутся, а следовательно, имеется и уверенность в дальнейшем улучшении показателей, характеризующих электротравматизм в нашей стране.

2.7 Электротравматизм в социалистических странах

В социалистических странах борьба с электротравматизмом, как и с травматизмом в целом, поднята до уровня государственной задачи. Своим кровным делом считают ее и профсоюзы. Во всех социалистических странах созданы институты охраны труда, координирующие друг с другом свою деятельность. Так, в Венгрии упорно работают над расшифровкой механизма действия электрического тока на живой организм. Как и в других социалистических странах, здесь обстоятельно расследуют каждую электротравму. Накоплен ценный опыт по разъяснению широким кругам населения опасностей, связанных с неосторожным использованием электрическими приборами, в том числе и светильниками.

В Польше широко развернулись исследования по оптимальному устройству систем заземления. Два международных симпозиума, проведенные там в 1968 и 1972 гг., внесли существенный вклад в разработку этого важного способа защиты от электричества.

Электрики Германской Демократической Республики по праву могут гордиться разработанными в этой стране весьма совершенными правилами устройства электрических установок и их безопасной эксплуатации. Принципы научной организации труда успешно внедряются здесь в работу энергосистем и энергохозяйств предприятий.

Плодотворно работают над проблемами электробезопасности и ученые Болгарии, о чем свидетельствуют многочис-

ленные публикации в софийском журнале «Энергетика». Значительный научно-технический интерес представляют приведенные там результаты определения напряжения, наводимого линиями электропередачи на находящиеся невдалеке от них металлические предметы [15]. Поводом для этого исследования послужила электротравма со смертельным исходом, возникшая в результате соприкосновения человека с металлической решеткой сада, вблизи которого проходила линия электропередачи. Показано, что опасное напряжение возникает только в момент короткого замыкания на линии. Нормируемое безопасное расстояние между металлическими предметами и линиями электропередачи является, таким образом, функцией передаваемого напряжения и тока короткого замыкания. Для линий напряжением 110 кВ и ниже безопасное расстояние в общем случае определено в 50 м. Эта величина подлежит уточнению для каждого конкретного случая. Еще важнее — принятие мер, надежно исключающих однополюсные короткие замыкания, в особенности на линиях электропередачи, проходящих по населенной местности.

В Чехословакии от электричества погибает в последнее время в среднем до 150 человек в год. По удельным показателям (число смертей на 1 миллион жителей и на 1 миллиард киловатт-часов потребленной электроэнергии) это соответствует средним европейским данным, но если сделать поправку на более полный учет электротравм, присущий всем социалистическим странам, то можно сказать, что Чехословакия уже сделала первый шаг к ликвидации очагов электротравм.

Появилась возможность сравнения электротравматизма в СССР и в капиталистических странах. Несмотря на большой объем проводимых работ с целью повышения электробезопасности в нашей стране, сопоставление числа несчастных случаев в СССР и капиталистических странах неутешительно для нас. Возрастание числа электротравм по всем показателям в первые послевоенные годы в СССР было таким же, как и во всех капиталистических странах. Но если в период 50-х годов в капиталистических странах наблюдается стабилизация электротравматизма, то в СССР продолжает увеличиваться число несчастных случаев от поражения электрическим током. Только в конце 70-х годов в СССР начинает снижаться электротравматизм, причем темпы снижения были более высокими, чем в капиталистических странах.

В 80-е годы в СССР наблюдается относительная стабилизация электротравматизма, однако по удельным показателям (число пораженных на 1 миллион человек) он остается выше,

чем в капиталистических странах. Так, например, в ФРГ и Японии коэффициент частоты достигает 1, в то время как в СССР он составляет 3,5—4, т. е. в год от электрического тока погибает около 1500 человек.

Огромный разрыв в показателях можно объяснить наличием высокого электротравматизма в СССР на непромышленных предприятиях (мелкие мастерские, коммунальные хозяйства, торговые предприятия). Кроме того, в СССР обязательны регистрация и расследование всех электротравм, что часто отсутствует в капиталистических странах. Весьма показательны данные, полученные в первое полугодие 1988 г. в Ленинграде. За этот период произошло 11 электротравм со смертельным исходом, из них на промышленных предприятиях или к ним отнесенных — всего 2, остальные 9 — в сетях непромышленного назначения.

Приведенные статистические данные позволяют сделать следующие выводы. Высокий электротравматизм в СССР объясняется:

- а) грубыми нарушениями электротехническим персоналом действующих правил и норм;
- б) слабым контролем за состоянием изоляции высоковольтного оборудования;
- в) низким качеством в отдельных случаях электрических приборов, особенно бытовых;
- г) отсутствием должного надзора за домовыми, коммунальными и квартирными сетями.

Перечень причин высокого показателя электротравматизма в СССР свидетельствует, что устранение возможных очагов электротравм не требует больших капитальных затрат и есть все основания полагать, что повышение требовательности к эксплуатации электрооборудования снизит этот показатель.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

3.1. Распределение электротравм по напряжениям установок

На установках какого напряжения преимущественно происходят электротравмы? Этот вопрос нередко задается людьми, занимающимися электробезопасностью. Огромный статистический материал, накопленный нами, позволяет дать на него исчерпывающий ответ.

Поражения на установках напряжением выше и ниже 1000 В. Прежде всего надо сказать о соотношении числа установок по этой основной градации *. Конечно, установок напряжением выше 1000 В неизмеримо меньше. Если к ним отнести повышающие трансформаторы, распределительные устройства и высоковольтные двигатели и конденсаторы, а к установкам напряжением ниже 1000 В — участки распределительной сети, электроприводы с пускорегулирующей аппаратурой и все остальные электроприемники, то получится соотношение, примерно равное 1/10 000. Что же показывает статистика? По нашим данным, охватывающим 1985 г. включительно, при эксплуатации установок напряжением ниже 1000 В произошло 76,8 %, а при эксплуатации установок напряжением выше 1000 В — 23,2 % всех электротравм, закончившихся смертью пораженных.

В это число попали и погибшие непосредственно от электрического тока на месте происшествия, и скончавшиеся спустя некоторое время после происшествия от ожогов, вызванных прохождением электрического тока. Но последних, т. е. погибших от ожогов, среди лиц, пострадавших на установках напряжением ниже 1000 В, были единицы, тогда как среди лиц, пострадавших на установках напряжением выше 1000 В, их было 68—76 %.

* Принятое в книге деление электротехнических установок на установки напряжением ниже и выше 1000 В несколько отличается от общепринятого. Во избежание недоразумений указываем, что под установками напряжением ниже 1000 В надо понимать установки напряжением до 1000 В включительно, фигурирующие в общепринятом делении.

Если не рассматривать тех, кто скончался от ожогов, а включить в число погибших лишь тех, чья смерть вызвана непосредственным действием тока, то окажется, что 82,8 % пострадавших погибло на установках напряжением ниже 1000 В (в том числе 1,4 % на установках напряжением 65 В и меньше), а 17,2 % — на установках напряжением выше 1000 В, в том числе на установках постоянного тока на радиостанциях и в лабораториях (7 случаев) и на высокочастотных установках при непосредственном прикосновении к токоведущим частям промышленной частоты (2 случая).

В СССР число пострадавших на установках напряжением ниже 1000 В составляло в 1951—1952 гг. 76,4 %, в 1964—1966 гг.—66,7 %, в 1975—1980 гг.—58,7 %, в 1980—1988 гг.—55 % [19]. Повышение удельного веса несчастных случаев в СССР на установках напряжением выше 1000 В представлялось явлением временным, связанным главным образом со значительным увеличением в сельском хозяйстве и коммунальных сетях числа установок напряжением выше 1000 В, подключенных непосредственно к государственным энергосистемам высокого напряжения и обслуживавшихся персоналом, квалификация которого в ряде мест оставляла желать лучшего. Однако это якобы временное явление оказалось весьма устойчивым: данные по отдельным районам страны свидетельствуют о все еще высоком удельном весе поражений в установках напряжением выше 1000 В. Причина прежняя — за счет поражений в сетях 6—10 кВ сельскохозяйственного назначения и в сетях временно-го электроснабжения на строительстве крупных промышленных объектов.

Болгария — одна из тех социалистических стран, в которой электротравматизм со смертельным исходом крайне невелик. Прежде всего следует отметить отсутствие электротравм, вызванных грубым нарушением трудовой дисциплины, и электротравм у электротехнических работников, что уже отмечалось. Это объясняется тем, сколь велика ответственность инженеров и техников за электробезопасность. В некоторые годы число электротравм в Болгарии составляло 2—9 за год при населении 9 миллионов. Это — минимальное число из всех социалистических стран и большинства капиталистических.

Поражения малым напряжением. Из установок напряжением ниже 1000 В крайне важно выделить установки напряжением 65, 36 и 12 В. Оказывается, смертельные поражения бывают и при этих напряжениях. По нашим данным, на установках 65 В и ниже погибало в 1951—1980 гг. по 28—34 чело-

века в год. Из данных [45] вытекает, что при «сварочном напряжении» (под ним понимается напряжение 90 В и ниже) ежегодно в среднем погибает около 40 человек. В 1960—1980 гг. на сварочных установках погибло 140 человек, в том числе 62 — непосредственно от сварочного напряжения (65—90 В), а остальные — от напряжения сети (127—380 В). В 1980—1988 гг. 54,3 % электротравм произошло от сварочного напряжения. В эти же годы снижение числа несчастных случаев на сварочных установках крайне мало.

Из литературных источников видно, что в США было немало поражений при напряжении 42 В и промышленной частоте тока 60 Гц.

Поскольку летальные исходы при поражениях малым напряжением существенно влияют на суждение о механизме воздействия электрического тока на человека, автор данной книги обращал самое серьезное внимание на относящуюся сюда документацию, а в тех случаях, когда ему приходилось выступать в качестве судебного эксперта, проводил наиболее тщательное расследование. Обычно, если несчастный случай происходил на подобных установках, возникало подозрение в возможности поражения более высоким напряжением — из-за повреждения изоляции обмотки 220 или 380 В и ее контакта с обмоткой 65, 36 или 12 В вследствие перекрытий или касаний токоведущих частей высокого напряжения или даже из-за перенапряжений. Эти подозрения имеют основания, так как, судя по актам, заключениям экспертизы и описаниям происшествий, иногда прикладываемым к протоколам испытаний, подобные случаи встречаются. По нашим подсчетам, около 30 % электротравм в установках напряжением 65, 36 и 12 В произошло вследствие того, что сеть этого напряжения оказывалась под напряжением 220 или 380 В.

Несмотря на сказанное, можно утверждать, что в действительности поражений малым напряжением значительно больше, чем об этом свидетельствует простой подсчет актов о несчастных случаях. В актах, как уже упоминалось в § 2.3, поражающее напряжение обычно определяется по напряжению сети или установки, а последнее всегда больше, ибо в электрической цепи с телом человека, как правило, имеются элементы сопротивления — обувь, одежда, пол и т. д.

Распределение лиц, пораженных малым напряжением, по профессиям приведено в процентах ниже:

Электросварщики	30,6
Электромонтеры	20,6

Рабочие других специальностей	13,5
Ученики и подсобные рабочие	26,2
Инженерно-технические работники и прочие	9,1

Итого: 100,0

Существенных изменений эти данные в последние годы не претерпели. Следует лишь отметить четко выраженную тенденцию к увеличению числа электротравм, приходящихся на долю электросварщиков. К тому же значительно возросло общее число пострадавших на устройствах напряжением 65—90 В. Все это объясняется не ухудшением качества сварочных аппаратов или менее грамотной их эксплуатацией. Напротив, то и другое улучшились. Причина — в быстрых темпах развития сварочной техники, в усложнении ее технологии, в результате чего численность людей, занятых электросваркой, и число сварочных агрегатов существенно и непрерывно возрастают. Роста электротравм при «сварочном напряжении» 65—90 В могло бы и не быть, если бы не продолжало господствовать, находя официальное подтверждение в нормативных документах, ошибочное мнение о линейной зависимости тяжелого исхода электротравмы от напряжения и не продолжало существовать ложное представление о безопасности малого напряжения. К сожалению, авторы работы [27], владея в этом плане достаточно убедительным материалом, должного анализа, а следовательно, и четких выводов в отношении опасности малого напряжения не сделали.

Весьма настораживает, хотя и не удивляет рост числа смертельных поражений в установках напряжением 110 и 220 В постоянного тока. Поражающее напряжение постоянного тока в этих случаях, как правило, меньше, причем подчас намного меньше напряжения установки. На стр. 45 все той же работы [27] указывается, что «в последние годы появился травматизм при работах на постоянном токе, причем не только при напряжении 500 В и выше (78 % от числа травм на высоком напряжении), но и при напряжении 220 и 110 В (22 %)». Авторы цитируемой работы и в этом отношении ограничиваются констатацией факта. Между тем весь анализ производственного травматизма имеет, на наш взгляд, основной целью именно корректировку «критерия безопасности» и разработку рекомендаций, касающихся принятия соответствующих мер безопасности.

В последующих главах, в которых приводится описание механизма действия электрического тока на человека, читатель сможет найти наше объяснение причин тяжелых по-

ражений малым напряжением постоянного тока. Здесь же отметим, что в ряде случаев принципиальной разницы между поражениями малыми напряжениями постоянного и переменного тока нет, ибо поражающим напряжением переменного тока опять-таки в ряде случаев является его амплитудное значение. Если оно равно значению постоянного тока, то эффект воздействия может быть однозначным.

Анализ собранных нами материалов показывает, что электрическим током малого напряжения довольно часто поражаются рабочие угольной промышленности, а также ремонтные рабочие. Из описаний происшествий видно, что обычно они возникают в особо сырых, плохо вентилируемых помещениях, в которых парциальное содержание кислорода в воздухе недостаточное, а углекислого газа — избыточное. Свыше 56 % лиц, погибших при малых напряжениях, находились в помещениях с нарушенным парциальным содержанием кислорода. В 1985—1990 гг. по сравнению с предыдущим пятилетием существенных изменений не было. В одних случаях это нарушение выражалось в увеличенном до нескольких процентов содержании углекислого газа (в одном помещении содержание его в воздухе составило даже 9,5 %), в других — в наличии природных, иногда пахучих примесей. Из изложенного совершенно ясен следующий вывод: нарушение парциального состава воздуха резко понижает сопротивляемость человека электрическому току и исход электротравмы при прочих равных условиях становится значительно тяжелее.

Пример 3.1. Поражение электрическим током происходит при весьма необычных обстоятельствах. Так, М. Ф. Крикунов и Ф. Ф. Скворцов описали [36] несчастный случай с Л., муж которой, по профессии инженер-электрик, с целью охраны своего сада установил сигнализацию по обычной звонковой схеме. Эта сигнализация состояла из сигнала-звонка, находившегося в квартире, круглого замыкателя, расположенного в саду, хлопчатобумажных ниток, натянутых в траве и прикрепленных к контакту замыкателя, подающего напряжение на звонок. Эта установка питалась от понижающего трансформатора 220/12 В, установленного внутри квартиры. Один из проводов напряжением 12 В шел в сад на общее кольцо. Садовладелец считал, что если на его участок проникнет постороннее лицо и разорвет одну из натянутых хлопчатобумажных ниток, то контакт замыкателя замкнет цепь и тем самым приведет в действие звонковый сигнал. Но обстоятельства сложились так, что замкнуло цепь не постороннее лицо...

Накануне происшествия шел дождь и было очень сыро. Утром, когда муж находился на работе, Л. вышла в сад. Вскоре соседи услышали непрерывные сигналы звонка, а затем обнаружили, что

причиной их явилась Л., лежавшая на земле без признаков жизни и касавшаяся шеей круглого замыкателя контактов.

Назначенная городской прокуратурой техническая экспертиза произвела тщательную проверку всей звонковой электрической сигнализации, а также остальной электропроводки в квартире. В электролаборатории была измерена изоляция электросети, а также проверена исправность понижающего трансформатора. Отклонение от правил техники безопасности экспертиза не обнаружила.

При судебно-медицинском исследовании было установлено, что смерть наступила от поражения электрическим током. Местом соприкосновения с токоведущей частью явилась переднебоковая поверхность шеи. В этой области на коже были видны две электрометки в виде полос и очаги ожога.

Смертельный исход, по мнению авторов описания, был вызван тем, что соприкосновение с токоведущей частью проводника произошло в области каротидного синуса, который расположен очень близко к поверхности кожи и представляет собой весьма чувствительную рефлексогенную зону. При его раздражении электрическим током можно получить картину шока. Рядом с каротидным синусом проходит блуждающий нерв, раздражение которого электрическим током способно вызвать остановку сердечной деятельности. Хотя электрический ток и распространяется по всему организму, однако в месте соприкосновения провода с телом плотность тока всего больше, а следовательно, и действие его всего сильнее. Возможно, что раздражение каротидного синуса и блуждающего нерва и привело к катастрофе. Необходимо учитывать и то обстоятельство, что в области шеи, особенно на боковых ее поверхностях, кожа обладает значительно меньшим сопротивлением электрическому току, чем в других областях тела.

По сообщению авторов, описавших этот случай, он является вторым случаем смертельного поражения электрическим током напряжением 12 В, зарегистрированным кафедрой судебной медицины Ростовского-на-Дону медицинского института.

Пример 3.2. Необычен и следующий случай, происшедший также в семье инженера-электрика и тоже при напряжении 12 В. Обстоятельства его таковы. Для нагрева воды в ванне был изготовлен самодельный электроподогреватель в виде укрепленной на деревянном бруске фарфоровой трубки диаметром 5 см с намотанной на нее реостатной проволокой диаметром 2 мм. Это устройство было подключено к специальному понижающему трансформатору напряжением 12 В. Брусек клали поперек ванны так, чтобы фарфоровая трубка находилась в воде. Когда температура воды достигала 36—40 °С, термореле отключало устройство и ванна была готова к пользованию. Поражение произошло при следующих обстоятельствах. Пожелавший принять ванну включил устройство и, не дождавшись отключения, решил рукой оценить температуру воды. Он погрузил правую кисть в воду, а левая в это время касалась корпуса ванны. Спасти пострадавшего не удалось, хотя квалифицированная помощь была оказана немедленно.

Последний случай представляет особый интерес потому, что, как показали результаты измерения, напряжение между водой в том месте, где находилась рука, и корпусом ванны составляло всего 4—5 В. Но и в предыдущем случае, описанном М. Ф. Крикуновым и Ф. Ф. Скворцовым, поражающее напряжение было ниже 12 В. Правда, в их описании указано только напряжение сети (12 В), но если принять во внимание падение напряжения на элементах сопротивления, оказавшихся включенными в сеть последовательно с телом человека, то с несомненностью выяснится, что поражающее напряжение в действительности было меньше напряжения сети. Эта разница между напряжением сети и поражающим напряжением особенно ощутима при малых напряжениях. Напомним, что в своей работе, посвященной определению безопасных * напряжений, Т. Гибберт [96] уже не исключал возможности поражения малым напряжением. Позднее несколько случаев поражения в сетях переменного тока напряжением 12 и 24 В были описаны и в других иностранных работах [85]. Весьма показателен случай, подробно рассмотренный в работе [103]. Изложим его в сокращенном виде.

Пример 3.3. Швея С. по дороге на швейную фабрику попала под дождь. Придя в цех, она сняла мокрую обувь и осталась в отсыревших чулках. Собираясь приступить к работе, она села на стул, левую ногу поставила на бетонный пол, правую — на металлический каркас швейной машины; при этом она правой рукой начала включать двигатель, а левой взялась за арматуру местного освещения напряжением 12 В. Изоляция светильника была повреждена, и швея оказалась в электрической цепи напряжением 12 В по схеме «левая рука — ноги». В результате — смертельное поражение током.

Подобные примеры теперь уже не вызывают удивления. Не встречаются и утверждения о том, будто поражения в сети малого напряжения происходят только в случае появления в этой сети напряжения 220 и 380 В.

Итак, установлены единичные случаи смертельных поражений напряжением 12 В промышленной частоты. На установках напряжением 36 и 65 В они носят уже далеко не единственный характер. Причина смерти — остановка дыхания.

Многие авторы, пытаясь объяснить летальные исходы, вызываемые малым напряжением, которое, вообще говоря,

* В ГОСТ 12.1.009—76 «безопасное напряжение» — недопустимый термин. В данной книге это понятие принято для оценки сравнительной опасности электрического тока, а также в историческом плане и имеет условный смысл.

считается безопасным, ссылаются на наличие у погибших тех или иных заболеваний. Однако роль этого фактора несколько переоценена, ибо в 86 % изученных нами актов судебно-медицинской экспертизы, составленных по поводу поражений малым напряжением, исчерпывающе указывалось, что пострадавшие были до электротравмы вполне здоровыми, физически крепкими людьми. Об этом же говорят и данные по возрасту распределения лиц, пострадавших на установках напряжением 65 В и меньше: 22 % из них было моложе 21 года, 65,5 % имели от 21 года до 30 лет и только 12,5 % было старше 30 лет. Следовательно, 88 % пострадавших находилось в молодом, наиболее цветущем возрасте. Причина поражения однозначна — возникновение электрической цепи через акупунктурные зоны.

3.2. Распределение электротравм по профессиональной принадлежности пострадавших

Пострадавшие на установках всех напряжений и разного рода тока в период 1980—1988 гг. распределялись (в процентах) по профессиям следующим образом:

Лица электропрофессий 48,0

В том числе:

электро- и радиомонтеры 33,0

электросварщики 5,9

крановщики 0,5

разные рабочие по обслуживанию электро- и радиоустановок 4,4

машинисты электросудов, водители электротранспорта 1,0

инженерно-технические работники электро- и радиопрофессий 3,2

Лица неэлектропрофессий 52,0

В том числе:

рабочие по холодной обработке и сборке машин и металлических конструкций (слесари, монтажники, токари и т. п.) 8,2

строительные рабочие (землекопы, штукатуры, плотники, сборщики и монтажники зданий и т. д.) 15,6

рабочие разных профессий (бурильщики, проходчики, навалотбойщики, сельскохозяйственные рабочие, мотористы, кочегары, зольщики, рабочие пищевой и легкой промышленности, агрономы, колхозники и т. п.) . . 16,2

грузчики и подсобные рабочие 8,6

инженерно-технические работники, младший обслуживающий персонал и служащие 3,4

Итого: 100,0

Последний случай представляет особый интерес потому, что, как показали результаты измерения, напряжение между водой в том месте, где находилась рука, и корпусом ванны составляло всего 4—5 В. Но и в предыдущем случае, описанном М. Ф. Крикуновым и Ф. Ф. Скворцовым, поражающее напряжение было ниже 12 В. Правда, в их описании указано только напряжение сети (12 В), но если принять во внимание падение напряжения на элементах сопротивления, оказавшихся включенными в сеть последовательно с телом человека, то с несомненностью выяснится, что поражающее напряжение в действительности было меньше напряжения сети. Эта разница между напряжением сети и поражающим напряжением особенно ощутима при малых напряжениях. Напомним, что в своей работе, посвященной определению безопасных* напряжений, Т. Гибберт [96] уже не исключал возможности поражения малым напряжением. Позднее несколько случаев поражения в сетях переменного тока напряжением 12 и 24 В были описаны и в других иностранных работах [85]. Весьма показателен случай, подробно рассмотренный в работе [103]. Изложим его в сокращенном виде.

Пример 3.3. Швея С. по дороге на швейную фабрику попала под дождь. Придя в цех, она сняла мокрую обувь и осталась в отсыревших чулках. Собираясь приступить к работе, она села на стул, левую ногу поставила на бетонный пол, правую — на металлический каркас швейной машины; при этом она правой рукой начала включать двигатель, а левой взялась за арматуру местного освещения напряжением 12 В. Изоляция светильника была повреждена, и швея оказалась в электрической цепи напряжением 12 В по схеме «левая рука — ноги». В результате — смертельное поражение током.

Подобные примеры теперь уже не вызывают удивления. Не встречаются и утверждения о том, будто поражения в сети малого напряжения происходят только в случае появления в этой сети напряжения 220 и 380 В.

Итак, установлены единичные случаи смертельных поражений напряжением 12 В промышленной частоты. На установках напряжением 36 и 65 В они носят уже далеко не единичный характер. Причина смерти — остановка дыхания.

Многие авторы, пытаясь объяснить летальные исходы, вызываемые малым напряжением, которое, вообще говоря,

считается безопасным, ссылаются на наличие у погибших тех или иных заболеваний. Однако роль этого фактора несколько переоценена, ибо в 86 % изученных нами актов судебно-медицинской экспертизы, составленных по поводу поражений малым напряжением, исчерпывающе указывалось, что пострадавшие были до электротравмы вполне здоровыми, физически крепкими людьми. Об этом же говорят и данные по возрастному распределению лиц, пострадавших на установках напряжением 65 В и меньше: 22 % из них было моложе 21 года, 65,5 % имели от 21 года до 30 лет и только 12,5 % было старше 30 лет. Следовательно, 88 % пострадавших находилось в молодом, наиболее цветущем возрасте. Причина поражения однозначна — возникновение электрической цепи через акупунктурные зоны.

3.2. Распределение электротравм по профессиональной принадлежности пострадавших

Пострадавшие на установках всех напряжений и разного рода тока в период 1980—1988 гг. распределялись (в процентах) по профессиям следующим образом:

Лица электропрофессий 48,0

В том числе:

электро- и радиомонтеры 33,0

электросварщики 5,9

крановщики 0,5

разные рабочие по обслуживанию электро- и радиоустановок 4,4

машинисты электросудов, водители электротранспорта 1,0

инженерно-технические работники электро- и радиопрофессий 3,2

Лица неэлектропрофессий 52,0

В том числе:

рабочие по холодной обработке и сборке машин и металлических конструкций (слесари, монтажники, токари и т. п.) 8,2

строительные рабочие (землекопы, штукатуры, плотники, сборщики и монтажники зданий и т. д.) 15,6

рабочие разных профессий (бурильщики, проходчики, навалотбойщики, сельскохозяйственные рабочие, мотористы, кокегары, зольщики, рабочие пищевой и легкой

По сравнению с 1975—1980 гг. существенных изменений не произошло.

Если эти данные, относящиеся к 1980—1988 гг., сопоставить с нашими же более ранними данными, то обнаружится изменение соотношения между числом электротравм среди лиц электро- и неэлектропрофессий, а также возрастание числа поражений инженерно-технических работников, особенно сотрудников научно-исследовательских институтов, в то время как число электротравм у инженерно-технических работников вузов, выполняющих научные работы и ведущих занятия со студентами, снизилось. Подобная тенденция отмечается также в работе [19] и зарубежными авторами. Но главное, что показывает приведенное выше распределение электротравм по профессиям пострадавших, это то, что среди лиц, пораженных электричеством, больше всего рабочих строительно-монтажных специальностей: электросварщиков, крановщиков (преимущественно строительных кранов), землекопов, штукатуров, монтажников, плотников и т. д. Это наблюдение согласуется с выводом, сделанным нами на основе распределения несчастных случаев по отраслям народного хозяйства и гласившим, что подавляющее число поражений происходит в тех отраслях народного хозяйства, где преобладают временные электросети; последние же, как известно, присущи преимущественно стройкам.

Основной причиной смертельных поражений электрическим током в сетях временного электроснабжения, а также на установках, эксплуатируемых в неотапливаемых помещениях, на воздухе или в условиях агрессивной среды, является недостаток на стройках таких кабелей, проводов, установочных материалов и оборудования, которые были бы специально предназначены для сетей временного электроснабжения и приспособлены к условиям производства строительно-монтажных работ. Применяемые здесь в большинстве случаев обычные кабели и установочные материалы и обычное электрооборудование теряют свои изоляционные свойства значительно быстрее, чем в условиях стационарных сетей. Особенно велико во временных сетях число механических повреждений изоляции, служащих источником аварий и несчастных случаев. Даже на достаточно механизированных строительных площадках можно видеть неогражденные сварочные уст-

Зарегистрированы случаи, когда откачиваемая вода оказывалась под напряжением по отношению к почве. Было бы ошибкой обвинять в этих нарушениях только строителей и монтажников, поскольку потребности строек до сих пор электропромышленностью целенаправленно не удовлетворяются и явно недостаточно апробированного хорошо специализированного строительного электрооборудования.

Немало важных мероприятий, направленных на повышение надежности сетей временного электроснабжения, осуществлено отдельными организациями. Так, на одном из крупных судостроительных заводов сети временного электроснабжения выполнены в виде разборных секций питания, смонтированных в трубах и соединенных с помощью особых разъемов. Такие сети обладают повышенной надежностью и хорошей сохранностью. К сожалению, строительства, даже ведущиеся монтажным способом, подобными разборными сетями не располагают.

Повышенная поражаемость током в сетях временного электроснабжения, так же как и в сельскохозяйственных сетях, объясняется недостатком квалифицированного обслуживающего персонала, а также плохой постановкой обучения лиц неэлектропрофессий, имеющих дело с электроустановками, основам их правильной эксплуатации. Сказывается и недооценка подавляющим большинством людей вполне реальной опасности так называемых малых напряжений (65 В и ниже). Впрочем, в этом повинно не столько легкомысленное отношение к собственному здоровью и даже к собственной жизни, свойственное некоторым людям, сколько противоречивость в оценке многими авторитетными исследователями критерия электробезопасности. Об этой противоречивости исходных положений при оценке критерия электробезопасности подробнее говорится в последующих главах.

Не только строители, но и химики, нефтяники, текстильщики и пищевики нуждаются в создании специализированных электротехнических средств — оборудования, кабелей и пускорегулирующей аппаратуры.

Так, характерной чертой некоторых цехов гардинно-тюлевых фабрик является наличие в воздухе взвешенных частиц графита. Оседая, частицы графитовой пыли проникают даже в самые малые отверстия, понижают электрическое сопротивление

По сравнению с 1975—1980 гг. существенных изменений не произошло.

Если эти данные, относящиеся к 1980—1988 гг., сопоставить с нашими же более ранними данными, то обнаружится изменение соотношения между числом электротравм среди лиц электро- и неэлектропрофессий, а также возрастание числа поражений инженерно-технических работников, особенно сотрудников научно-исследовательских институтов, в то время как число электротравм у инженерно-технических работников вузов, выполняющих научные работы и ведущих занятия со студентами, снизилось. Подобная тенденция отмечается также в работе [19] и зарубежными авторами. Но главное, что показывает приведенное выше распределение электротравм по профессиям пострадавших, это то, что среди лиц, пораженных электричеством, больше всего рабочих строительно-монтажных специальностей: электросварщиков, крановщиков (преимущественно строительных кранов), землекопов, штукатуров, монтажников, плотников и т. д. Это наблюдение согласуется с выводом, сделанным нами на основе распределения несчастных случаев по отраслям народного хозяйства и гласившим, что подавляющее число поражений происходит в тех отраслях народного хозяйства, где преобладают временные электросети; последние же, как известно, присущи преимущественно стройкам.

Основной причиной смертельных поражений электрическим током в сетях временного электроснабжения, а также на установках, эксплуатируемых в неотапливаемых помещениях, на воздухе или в условиях агрессивной среды, является недостаток на стройках таких кабелей, проводов, установочных материалов и оборудования, которые были бы специально предназначены для сетей временного электроснабжения и приспособлены к условиям производства строительно-монтажных работ. Применяемые здесь в большинстве случаев обычные кабели и установочные материалы и обычное электрооборудование теряют свои изоляционные свойства значительно быстрее, чем в условиях стационарных сетей. Особенно велико во временных сетях число механических повреждений изоляции, служащих источником аварий и несчастных случаев. Даже на достаточно механизированных строительных площадках можно видеть неогражденные сварочные устройства и подъемные механизмы. Обычные провода, не предназначенные для работы на открытом воздухе, крепят к доскам, часто сырым, а то и укладывают прямо на землю. В насосных установках нередко применяют двигатели, предназначенные для стационарных металлорежущих станков.

Зарегистрированы случаи, когда откачиваемая вода оказывалась под напряжением по отношению к почве. Было бы ошибкой обвинять в этих нарушениях только строителей и монтажников, поскольку потребностистроек до сих пор электропромышленностью целенаправленно не удовлетворяются и явно недостаточно апробированного хорошо специализированного строительного электрооборудования.

Немало важных мероприятий, направленных на повышение надежности сетей временного электроснабжения, осуществлено отдельными организациями. Так, на одном из крупных судостроительных заводов сети временного электроснабжения выполнены в виде разборных секций питания, смонтированных в трубах и соединенных с помощью особых разъемов. Такие сети обладают повышенной надежностью и хорошей сохранностью. К сожалению, строительства, даже ведущиеся монтажным способом, подобными разборными сетями не располагают.

Повышенная поражаемость током в сетях временного электроснабжения, так же как и в сельскохозяйственных сетях, объясняется недостатком квалифицированного обслуживающего персонала, а также плохой постановкой обучения лиц неэлектропрофессий, имеющих дело с электроустановками, основам их правильной эксплуатации. Сказывается и недооценка подавляющим большинством людей вполне реальной опасности так называемых малых напряжений (65 В и ниже). Впрочем, в этом повинно не столько легкомысленное отношение к собственному здоровью и даже к собственной жизни, свойственное некоторым людям, сколько противоречивость в оценке многими авторитетными исследователями критерия электробезопасности. Об этой противоречивости исходных положений при оценке критерия электробезопасности подробнее говорится в последующих главах.

Не только строители, но и химики, нефтяники, текстильщики и пищевики нуждаются в создании специализированных электротехнических средств — оборудования, кабелей и пускорегулирующей аппаратуры.

Так, характерной чертой некоторых цехов гардинно-тюлевых фабрик является наличие в воздухе взвешенных частиц графита. Оседая, частицы графитовой пыли проникают даже в самые малые отверстия, понижают электрическое сопротивление поверхности кожи человека, ухудшают изоляционные свойства материалов. Нормальный режим изоляции обычного (незащищенного) оборудования нарушается. На пускателях и даже на технологическом оборудовании появляется напряжение. Если оно даже и не приводит к электро-

ях, в электросетях и на магистральных линиях электропередачи, обучены правилам электробезопасности наилучшим образом. Тем не менее трагические исходы грубых нарушений этих правил, допускаемых опытными, дисциплинированными и, казалось бы, безупречными работниками, носят далеко не единичный характер. Видимо, немалую роль в этих нарушениях играет психогенный фактор. Отсюда задача — внедрить в практику по отношению к лицам электропрофессий те приемы оценки трудовой собранности эксплуатационного персонала и те методы изучения энергоресурса операторов с помощью различного рода тренажеров и измерительных комплексов, которые весьма успешно применяются в авиации и на железнодорожном транспорте.

Очень настораживает увеличение за последние годы числа поражений электрическим током женщин (на 40 %). Одна из причин — увеличение числа работающих женщин на предприятиях. Тем более необходимо усилить обучение женщин, особенно из числа лиц электропрофессий, правилам электробезопасности.

3.3. Распределение электротравм по роду тока

Одно из важных наблюдений, сделанных за последнее время сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института охраны труда ВЦСПС (г. Ленинград), состоит в том, что поражения со смертельным исходом при напряжении 110 и 220 В постоянного тока носят далеко не единичный характер.

В обзорах нашей и зарубежной литературы прежних лет описания поражений постоянным током напряжением ниже 1000 В были крайне редки. Поэтому в первых двух изданиях «Основ электробезопасности» они даже не приводились. Но в 1973 г. автору пришлось принять участие в расследовании поражения со смертельным исходом при напряжении постоянного тока около 80 В. Погиб опытный электротехник, старший научный сотрудник П., весьма пренебрежительно относившийся к опасности такого тока. Вот этот случай.

Пример 3.4. Шел электрохимический эксперимент. Небольшой электролизер находился на столе и был включен в цепь последовательно с десятью другими аналогичными приборами. Общее напряжение подавалось от сети 120 В; источником была машина постоянного тока, обеспечивавшая питание всех лабораторных рабочих мест. Поскольку помещение лаборатории относилось к категории «с повышенной электроопасностью», пол его был выложен метлахскими плит-

ками, а сеть электроосвещения 380/220 В выполнена особенно тщательно, с применением надежно изолированного оборудования.

Обнаружив, что в одном из электролизеров процесс протекал иначе, чем в остальных, П. сказал лаборанту: «Контакт плохой и напряжение на нем упало», взял в правую руку отвертку с изолирующей пластмассовой ручкой и стал завинчивать винт, ослабление которого вызвало, по его мнению, перераспределение напряжения на электролизере. При этом левая рука касалась влажной рабочей поверхности стола. Буквально через несколько секунд после начала работы он вскрикнул и медленно сполз на пол, где и остался в полусидячем положении. Обследование не обнаружило электрометок на теле пострадавшего. Поверхность изолирующей части отвертки оказалась покрытой раствором электролита. Заключение судебно-медицинского эксперта гласило: «Асфиксия, поражение центров дыхания головного мозга». Имитация электрической цепи (а выполнить ее не составило труда) показала, что максимальное напряжение, которым мог быть поражен пострадавший, не превышало 80 В. Время, в течение которого он находился под напряжением, ограничивалось секундами.

Приведенный пример крайне поучителен, ибо судебно-медицинское вскрытие тела пострадавшего удалось произвести уже через пять часов после смерти. Гистологическое исследование тканей селезенки, головного мозга и других органов показало наличие симптомов, убедительно свидетельствовавших о специфическом поражении центральной нервной системы. По-видимому, в данном случае было совмещение ряда неблагоприятных обстоятельств, отсутствовал и «фактор внимания» (см. § 6.2), поскольку под аналогичное напряжение пострадавший, как показал опрос сотрудников, прежде неоднократно попадал без всяких последствий и был совершенно уверен в его безопасности.

В целом все же есть основания считать напряжение постоянного тока менее опасным, чем напряжение переменного тока. Об этом говорит опыт работы ленинградского трамвая с его весьма протяженной контактной сетью напряжением 600 В и несколькими преобразовательными подстанциями, в прошлом питавшимися от сети переменного тока частотой 25 Гц. Прослеженная нами более чем полувековая история существования этого крупного трамвайного хозяйства насчитывает немало случаев поражения электрическим током, но ни один из них не окончился смертельным исходом, вызванным непосредственно действием постоянного тока.

Пример 3.5. Крайне показателен случай, происшедший на одной из трамвайных подстанций. Очищая оборудование от пыли, дежурный монтер коснулся по неосторожности шины 600 В постоянного тока. Отдернуть руку и оторваться от шины монтер не смог. Он крепко зажал ее и находился в цепи около полуминуты — до тех пор, пока

его помощник не снял напряжение. Никакой потери трудоспособности не произошло. Пострадавший рассказывал, что он почувствовал сильнейший удар и его начало притягивать к шине; ни позвать на помощь, ни даже крикнуть он не мог.

Пример 3.6. Как сообщают Гудэрски и Тересяк, монтер одной из польских трамвайных подстанций охватил левой рукой столб, а правой коснулся токоведущих частей, находившихся под напряжением по отношению к земле, равным 600 В. Левая рука его касалась заземленной конструкции, и поэтому поражающее напряжение полностью соответствовало напряжению сети. В момент удара током монтер потерял голос, обе руки его парализовало и он не мог оторвать их от столба и тем самым разорвать цепь. Заметив случившееся, его помощник отключил источник напряжения. В момент снятия напряжения парез (паралич) руки мгновенно прошел, к монтеру вернулась речь. По его словам, он не терял сознания, но что-либо крикнуть или оторваться от токоведущих частей не мог.

Лица, давно занятые эксплуатацией трамвайных тяговых подстанций, утверждают, что электротравмы, заканчивавшиеся благоприятным исходом и даже не сопровождавшиеся тяжелыми ожогами, встречались и ранее. Добавим, что, судя по описаниям, все они происходили по схеме «ладонь — нога» или же «ладонь — ладонь».

К выводу о меньшей опасности постоянного тока низкого напряжения приходит и Ф. Л. Школдин [42], сообщивший, что в Витебске «...ранее все электроснабжение было на постоянном токе и несчастных случаев от электрического тока вообще не было. При переводе половины города на электро-снабжение переменным током от сети напряжением 380/220 В в первый же год было зарегистрировано 6 смертельных поражений, и в среднем это число сохранялось в течение последующих 6 лет». Из работы С. А. Пресса следует, что подобное положение наблюдалось и в других городах Белоруссии (Могилев, Речица и т. д.).

Аналогичные наблюдения сделал С. Еллинек [22] по городам Австрии, которые вначале имели сети постоянного тока, а затем перешли на переменный ток того же напряжения. Как и в городах Белоруссии, с этим переходом появились электротравмы со смертельным исходом. О меньшей опасности постоянного тока в сравнении с переменным током частотой 60 Гц пишут и в американской литературе.

К сожалению, во всех этих выводах о сравнительной опасности постоянного и переменного тока одного и того же действующего значения не обращается внимание на то, что при переменном токе поражающее амплитудное напряжение может быть в 1,4 раза больше действующего. А это весьма

существенное обстоятельство, ибо не исключена возможность того, что именно им объясняется повышенная опасность переменного тока по сравнению с постоянным током того же напряжения.

Нами зафиксированы два смертельных поражения напряжением выше 1000 В постоянного тока. Одно из них произошло на высоковольтном оборудовании ремонтируемого радиопередатчика, на который ошибочно было подано напряжение 5 кВ. Техник, зачищавший в этот момент контакты, был мгновенно поражен насмерть. Второй случай произошел на откачном посту электролампового завода. Электромонтер, грубо нарушив правила безопасности, зашел за ограждение и рукой коснулся провода, находившегося под высоким напряжением. Через месяц он умер от полученных ожогов.

По данным Всесоюзного научно-исследовательского института охраны труда ВЦСПС (г. Ленинград), в 1964—1966 гг. на постоянный ток напряжением выше 110 В пришлось 4,4 % всех смертельных электротравм. Это намного больше, чем в предшествующие годы. Причина такого роста заключается в несомненном увеличении числа действующих установок постоянного тока. При всем том число поражений со смертельным исходом на установках постоянного тока в удельных показателях, как по сведениям [19], так и по позднейшим данным, много меньше, чем на установках переменного тока.

Но положение дел с электротравмами, закончившимися временной потерей трудоспособности, совершенно иное. На четырех обследованных заводах 13 % общего числа электротравм с временной потерей трудоспособности и электрических ударов произошло на установках постоянного тока, число же таких установок составляет на этих предприятиях лишь десятую часть общего числа электроустановок. Относительно большой процент электрических ударов и легких травм на установках постоянного тока можно объяснить, с одной стороны, менее осторожной эксплуатацией оборудования, а с другой — тем, что ожоги дугой постоянного тока переносятся тяжелее ожогов переменным током.

Оценке сравнительной опасности постоянного и переменного тока посвящен ряд работ [3, 42]. Выводы в них не противоречат приведенным выше наблюдениям. В § 9.5 будут рассмотрены причины, порождающие различия в действии тока разного рода.

3.4. Распределение электротравм по условиям возникновения электрической цепи через тело человека

Данные соответствующего изучения несчастных случаев приведены ниже в процентах:

Непосредственное касание токоведущих частей оборудования, находящихся под напряжением	51,9
В том числе:	
случайное, не вызванное производственной необходимостью	23,2
соприкосновение в процессе производственной работы	3,4
ошибочная подача напряжения во время ремонтов и т. д.	25,3
Соприкосновение с частями электрооборудования и проводов, нормально не находящихся под напряжением	27,8
В том числе:	
при отсутствии заземления электрооборудования, обрыве заземляющей проводки, при наличии заземления, обладающего большим сопротивлением	23,2
в случае резкого ухудшения изоляции	4,6
Касание токоведущих частей инструментом или каким-либо предметом	14,0
Касание пола, стен, оказавшихся под напряжением вследствие понижения сопротивления изоляции, поражение шаговым напряжением	5,3
Поражение через дугу	1,0

Итого: 100,0

Увеличение числа электротравм наблюдается в период 1975—1985 гг. за счет некачественного изготовления электроизоляции.

Изучение тех довольно скудных данных по рассматриваемому вопросу, которые можно найти в литературе, показывает, что эти цифры объективно и достаточно полно отражают условия возникновения электрической цепи через тело человека. Одной из основных причин, обуславливающих образование поражающей цепи, является соприкосновение с токоведущими частями «через предмет». Эти предметы весьма различны. Среди них: лестница, которая при переносе ее людьми задела за обнаженный провод; кабина крана, которой коснулись в момент, когда его стрела рвала провод; клеммы, находившиеся под напряжением; инструмент с поврежденной изоляцией; мокрая доска, на которой был укреплен пускатель с клеммой, касавшейся доски, и т. п.

3.5. Распределение электротравм по видам оборудования

Анализ травматизма по отдельным видам оборудования представляет немалый практический интерес хотя бы потому, что он может дать богатый материал для предъявления конкретных рекламаций предприятиям, выпускающим электрическое оборудование.

В табл. 3.1 приведено распределение электротравм по видам оборудования в СССР и Англии. Оно не претендует на особую точность. Спорным в ряде случаев являлось отнесение той или иной электротравмы к сетям или к электроприводу, к силовым сетям или к осветительным. Но это не меняет важного вывода, следующего из данных таблицы и сводяще-

Таблица 3.1. Распределение электротравм по видам оборудования

Наименование оборудования	Процент от общего числа обследованных случаев	
	СССР	Англия
Электрооборудование электрических сетей и электростанций, включая распределительные устройства, силовые трансформаторы в сети	42,3	34,4
В том числе:		
воздушные сети, включая и временные	29,4	
подземные и кабельные сети, и внутренняя проводка	12,9	
Электрифицированный транспорт	7,4	
В том числе:		22,3
электрооборудование и провода магистральных и пригородных железных дорог	2,1	
внутризаводской транспорт	5,3	
Электропривод, включая пускорегулирующую аппаратуру	22,2	22,3
Сварочные аппараты и временная проводка к ним	8,1	22,9
Высоочастотные установки	1,5	—
Электрооборудование подъемно-транспортных механизмов	4,8	4,0
Ручной переносной инструмент и провода к нему	3,3	5,0
Электроосвещение	9,4	8,9
В том числе:		
стационарное	7,2	
переносное	2,2	
Прочее	1,0	2,5
Итого:	100,0	100,0

гося к тому, что на малоэнергоёмком оборудовании имеется заметный процент поражений. К такому оборудованию относятся высокочастотные установки, сварочные агрегаты, переносные электроинструменты. В ходе дальнейшего изложения остановимся на каждом из этих видов оборудования. Здесь же укажем, что данные по Англии частично взяты из статистических обзоров, автор которых распределял оборудование по видам не совсем так, как это сделано нами. Поэтому его данные пришлось частично переработать, чтобы сделать их сопоставимыми с данными по СССР. В примерном сравнении такая переработка представляется нам вполне допустимой, хотя и не претендует на особую точность.

Сопоставление указывает на достаточное совпадение данных по электроприводу и по электрооборудованию подъемно-транспортных механизмов и на резкое различие по сварочным агрегатам. Заметим, что в СССР, где сварка распространена не меньше, чем в Англии, число таких поражений намного ниже. И если мы нередко говорим о недостаточной электробезопасности наших электросварочных работ, то в Англии упущений в этом отношении, по-видимому, еще больше.

Распределение электротравм по видам оборудования преследует цель выявить, в чем кроется причина поражения — в недочетах конструирования, изготовления и монтажа электрооборудования или же в низкой культуре его эксплуатации. В литературе по этому вопросу имеется крайне мало данных, что нельзя не поставить в связь с трудностями получения исходных сведений. Проведенное нами изучение актов о несчастных случаях позволяет выделить три группы причин:

а) около 40—45 % электротравм объясняются недочетами эксплуатации оборудования, приводящими к снижению сопротивления изоляции, к появлению напряжения на токоведущих частях оборудования, которые не должны быть под напряжением, и, наконец, к неотключению оборудования при электрических повреждениях;

б) не менее 25—30 % электротравм вызываются неудовлетворительной организацией рабочего места и недостаточным инструктированием работников, следствием чего могут быть: подача напряжения на оборудование, на котором работают люди; прикосновение к находящимся под напряжением токоведущим частям; неправильные операции с оборудованием, представляющим опасность для работающих; неумение оказать первую помощь пострадавшему;

в) от 30 до 35 % поражений вызываются недочетами конструкции и монтажа оборудования, например наличием открытых или ненадежно укрытых токоведущих частей, при-

менением металлических кожухов и элементов конструкций (там, где могут применяться кожухи из изоляционных материалов), недостаточностью расстояния между токоведущими частями и металлическими элементами оборудования и т. д.

Если вторая группа причин сводится, по существу, к условиям эксплуатации, а третья — к недочетам конструкции и монтажа оборудования, то первая охватывает и условия эксплуатации, и недочеты конструкции.

Следовательно, в первом приближении можно считать, что 52 % всех поражений происходят из-за неудовлетворительной эксплуатации.

Эта оценка близка к данным [27], где указывается, что из-за неудовлетворительной эксплуатации происходит 58 % всех электротравм. А отсюда следует важный вывод: электротравматизм в короткий срок может быть сокращен вдвое, поскольку недочеты эксплуатации, и в первую очередь отсутствие должной профилактики, устранимы простыми организационно-техническими мероприятиями и повышением производственной дисциплины.

Значительно сложнее устранить дефекты изготовления, начиная от проектирования и кончая монтажом. Наличие их свидетельствует о том, как сложна проблема надежности, а возможно, и о том, как недостаточно внимание к ней. Решение этой проблемы должно будет в конце концов привести к полному устранению электротравматизма.

Анализируя электротравматизм, полезно выводить его удельные показатели по различным видам оборудования. Вот что дает сопоставление некоторых удельных показателей.

Если число электротравм, приходящихся на один электродвигатель, принять за единицу, то окажется, что на один электросварочный аппарат их приходится в 41 раз, на один переносный или передвижной временный электроприемник — в 72 раза, а на одну высокочастотную установку — в 118 раз больше.

Небезынтересно определить также соотношение электротравм, происходящих в стационарных и временных сетях напряжением ниже 1000 В. Приняв число электротравм, приходящихся на 1000 км стационарной электросети за единицу, установим, что на ту же протяженность временной сети их приходится в 35 раз больше.

Только что названные нами удельные показатели подсчитаны по материалам специального обследования, проведенного на нескольких предприятиях, и распространять их на всю промышленность страны было бы, конечно, неправильно. Тем не менее они отображают в известной степени и общую

картину. Так, не приходится сомневаться в том, что технический уровень эксплуатации стационарных электродвигателей значительно выше, чем другого электрооборудования. Это объясняется, в частности, тем, что стационарные электродвигатели обладают меньшим числом конструктивных недостатков и дефектов, допущенных в процессе изготовления.

Электротравмы происходят на оборудовании, весьма различном как по назначению, так и по конструкции. Поэтому непросто сформулировать общие пожелания по повышению его надежности, исходя к тому же лишь из анализа электротравматизма. Однако мы, пожалуй, не ошибемся, если выдвинем следующие рекомендации:

а) при проектировании и изготовлении электрооборудования надо стремиться выполнять конструктивные детали и конструкции в целом по возможности из изоляционных материалов;

б) надо применять такие изоляционные материалы, которые надежно сохраняют изолирующие свойства;

в) металлические части аппаратов и приборов, могущие оказаться при пробое изоляции под напряжением, следует окрашивать краской, обладающей изолирующими свойствами;

г) аппараты со сложной системой напряжения, и особенно те из них, которые приходится вскрывать в процессе их эксплуатации, надлежит снабжать простой и надежной блокировкой, исключающей возможность «шунтирования»;

д) должен быть обеспечен свободный доступ ремонтного персонала к токоведущим частям;

е) марки применяемых проводов и кабелей должны соответствовать условиям эксплуатации оборудования;

ж) при конструировании оборудования необходим всесторонний учет опыта эксплуатации, и в особенности уроков происшедших аварий и электротравм.

Чтобы конкретизировать эти общие пожелания применительно к отдельным видам оборудования, необходимо усилить деятельность научно-исследовательских институтов, технических институтов, энергоинспекций энергонадзоров, энергоуправлений и энергосистем министерств и ведомств по систематизации и обобщению эксплуатационного опыта энергетиков предприятий. Работы в этом плане ведутся немалые. Их отражением являются многочисленные публикации в технических журналах, а также рекламации, направляемые заводам — изготовителям оборудования. Однако размах всей этой деятельности еще недостаточен. Поэтому представляется целесообразным остановиться на некоторых результатах пред-

принятого нами специального изучения электротравм на различных видах оборудования, в процессе которого тщательно расследовались технические обстоятельства поражений.

Воздушные линии электропередачи. Несчастные случаи в воздушных сетях напряжением ниже и выше 1000 В (в процентах) произошли при следующих обстоятельствах:

Ремонт сети	.38,3
Обрыв и схлестывание проводов	.22,7
Производство строительных работ вблизи линии электропередачи	.13,1
Подключение и переключение	.11,8
Прочие обстоятельства	.14,1

Итого: 100,0

В прошлые годы доля электротравм, возникших в результате обрыва и схлестывания проводов, составляла 26,7 %. Некоторое снижение этой доли следует объяснить применением более надежной системы крепления, профилактикой и, наконец, разъяснительной работой среди населения об опасности прикосновения к оборвавшемуся проводу.

К числу подключений и переключений отнесены и случаи ошибочного попадания персонала в ячейки, находящиеся под напряжением.

В группу поражений при прочих обстоятельствах вошли несчастные случаи, вызванные наведенным напряжением. О возможности подобных травм предупреждал еще в 20-х годах этого столетия, т. е. в самом начале электрификации страны, А. А. Смуров [64]. Он первым предположил, что мощные линии электропередачи могут наводить достаточно большие напряжения на расположенные параллельно электрические цепи связи и линии передачи. В этом отношении А. А. Смуров оказался провидцем. По мере развития магистральных линий передачи стали возникать поражения наведенным напряжением, вызванные работающими линиями. Один из таких случаев приводит Л. Д. Наумовский.

Пример 3.7. Требовалось заменить провода отключенной линии передачи 110 кВ. Другая линия передачи, подвешенная к тем же опорам, находилась под напряжением. Установив на анкерной опоре заземление на все три провода, монтер приступил к разрезанию петли. При этом другой рабочий устанавливал однофазное заземление. Надрезав петлю, монтер начал перегибать провод обеими руками. Когда последняя жилка обломилась, он получил электрический удар. Анализ несчастного случая показал, что пострадавший попал под напряжение, наведенное на отключенной линии несбалансированно

вения к пускателю, покрытому дисперсным графитом, применявшимся для смазки машины.

Четыре несчастных случая были вызваны соприкосновением с незаземленными газовыми трубами, внутри которых были проложены провода. В двух случаях из этих четырех трубы оказались под напряжением вследствие повреждения изоляции провода у выхода штепсельной розетки, в третьем — в результате того же, но в месте подключения к выключателю, в четвертом случае токоведущий провод непосредственно коснулся трубы, внутрь которой попала вода, снизившая сопротивление изоляции в месте соединения проводов.

Следует отметить, что наши тревожные сигналы о низком качестве подключающих устройств не остались неслышанными. Теперь щиты, рубильники, патроны, штепсельные розетки стали изготавливаться, как правило, строго по стандарту. В результате число смертельных поражений, вызванных низким качеством установочных изделий, уменьшилось в несколько раз.

Поражения током на подземных кабелях разных напряжений в 60 % случаев были вызваны прикосновением либо к оголенным концам кабельных разделок, либо к кабелям с поврежденной изоляцией при отсутствии заземления.

Механические повреждения кабелей происходили при земляных работах, при наездах транспорта на незащищенный кабель, проложенный по территории предприятия, при пробивке шлямбуром отверстий в стенах под крюки или шурупы. Заметим, что подавляющее число механических повреждений кабеля приводило к образованию электрической цепи через тело человека, но воздействие этой цепи сводилось лишь к электрическому удару, хотя в иных условиях такая же цепь нередко влекла за собой травмы со смертельным исходом. Здесь мы сталкиваемся, по-видимому, с действием «фактора внимания» (особое состояние настороженности у человека, осознающего опасность выполняемой им работы), о чем подробнее будет говориться в § 6.2.

Пятнадцать поражений произошло в результате прикосновения к стенам и к полу, оказавшимся под напряжением. Напряжение появлялось там вследствие недостаточной изоляции проводов в местах переходов через стены и между этажами. Эти поражения наблюдались преимущественно в коммунально-бытовых и лечебных помещениях, где провода в переходах изолируются недостаточно надежно.

Анализ показывает, что основными причинами поражений человека в электрических сетях являются:

а) несоблюдение элементарных защитных мероприятий;
б) применение в сырых и особо сырых помещениях, а также на открытом воздухе проводов и подключающих устройств (розетки, переходные втулки, изоляторы, щиты и т. п.), не предназначенных для работы в таких условиях;

в) слабый контроль за состоянием заземления и зануления пусковой и защитной аппаратуры;

г) недостаточный профилактический ремонт сетей и пусковой и защитной аппаратуры, а также недооценка опасности, которую представляет для людей напряжение ниже 127 В;

д) грубые нарушения технической эксплуатации оборудования.

Трансформаторы и распределительные устройства. На силовых трансформаторах несчастные случаи встречаются сравнительно редко. 60 % случаев происходило при ремонте трансформаторов, протирке изоляторов и т. п., 28 % случаев — при подключениях и отключениях трансформаторов и 12 % — при прочих обстоятельствах. Около 74 % общего числа поражений возникло на высоковольтной стороне трансформаторов.

На распределительных устройствах поражения разделяются следующим образом: в 50,3 % случаев они явились следствием соприкосновения с токоведущими частями в процессе работы оборудования, в 32,7 % — результатом прикосновения к токоведущим частям при монтаже и ремонте оборудования, в 17 % случаев они произошли при прочих обстоятельствах.

62,8 % общего числа электротравм на распределительных устройствах имели место на сетевых трансформаторных подстанциях, 15,4 % — непосредственно на масляных выключателях, 18,2 % — на разъединителях. При этом 94,3 % всех несчастных случаев на распределительных устройствах при напряжении выше 1000 В произошло с лицами электропрофессий. В Болгарии, например, в период 1975—1985 гг. были годы, когда не произошло ни одной электротравмы со смертельным исходом.

Одно поражение явилось результатом прикосновения к незаземленному корпусу трансформатора с поврежденной изоляцией. В 68,1 % несчастных случаев тяжелый исход наступил не в момент возникновения электрической цепи через тело человека, а позднее и явился следствием сильных ожогов, вызванных дугой.

Анализ поражений на силовых трансформаторах и распределительных устройствах показывает, что число электро-

травм на этих видах оборудования сравнительно невелико.

Причиной поражений является, как правило, неудовлетворительная организация работ. Это делает ее улучшение важной задачей.

Электропривод. Большой процент поражений (22,2 % общего их числа) падает на обслуживание электропривода. Но поскольку электропривод является основным видом промышленных электроустановок, можно сказать, что здесь несчастные случаи происходят относительно реже, чем на любых других видах электрооборудования. Если общее число электротравм на электроприводе принять за 100 %, то поражения на электродвигателях напряжением ниже 1000 В составят 86 %.

Только в 28,4 % несчастных случаев на электроприводе пострадавшими оказались лица электропрофессий. Стало быть, основной причиной травматизма на электроприводе является то, что переключения и подключения оборудования, замену предохранителей и тому подобные операции выполняют лица неэлектропрофессий, которые производят эти работы без снятия напряжения.

Нельзя не обратить внимания и на недостаточную надежность изоляции маломощных электродвигателей. Зарегистрировано восемь смертельных поражений, явившихся результатом прикосновения к выводам электродвигателей. Это связано с тем, что большое число маломощных электродвигателей поступает на монтаж без клеммных коробок. Кустарное их изготовление или соединение вообще без коробок снижают прочность изоляции в местах подключенных соединений.

Зарегистрировано восемь смертельных поражений, возникших от прикосновения токоведущих проводов к крышкам клеммных коробок, которые из-за отсутствия заземления оказались под напряжением. Как известно, между клеммной коробкой и корпусом станка имеется изоляционная прокладка, и потому замыкание на корпус клеммной коробки не приводит к короткому замыканию. Вот почему металлическая крышка клеммной коробки может длительное время находиться под напряжением, и это остается незамеченным.

Обе только что указанные причины поражений чрезвычайно опасны, потому что выявить их существующими методами профилактических испытаний очень трудно. Чтобы избежать повторения подобных поражений, нужно улучшить конструкцию выводов электродвигателей и клеммных коробок и, кроме того, применять лишь такие коробки, которые сделаны из изоляционных материалов.

Поражения, вызванные прикосновением к незаземленным корпусам электродвигателей, относятся главным образом к электродвигателям, работающим в наружных сетях и предназначенным для строительных и ремонтных работ. Особенно много электротравм этого рода регистрируется в сельском хозяйстве, в первую очередь на животноводческих фермах.

Три несчастных случая явились следствием попадания пыли и грязи на обмотки электродвигателей и в пускорегулирующую аппаратуру. Надо сказать, что эти электродвигатели не были приспособлены для работы в пыльных и грязных помещениях. Один не смертельный, но тяжелый несчастный случай произошел с опытным электромонтером вследствие того, что монтаж пусковой и защитной аппаратуры на современных электродвигателях не унифицирован: в одних случаях аппаратура легкодоступна для осмотра и ремонта, в других доступ к ней весьма затруднен. Монтер привык к определенному расположению токоведущих частей и, обслуживая новый электродвигатель, где они расположены иначе, коснулся токоведущих частей при замене предохранителей. Он получил удар током, отдернул руку и инструментом, который находился в этой руке, непроизвольно замкнул токоведущие части, что и повлекло за собой тяжелые ожоги.

Следует отметить, что единообразие в расположении защитной аппаратуры и пускорегулирующих устройств отсутствует и у станков новейших отечественных марок, хотя унификация здесь крайне необходима.

Отрадно, что в последние годы значительно улучшилась изоляция пускателей, в связи с чем число поражений, вызванных ее неисправностью, уменьшилось.

Анализируя поражения электрическим током на электроприводе, надо подчеркнуть, что чаще всего они вызываются неудовлетворительным состоянием его вспомогательных элементов. Специальные электродвигатели с аппаратурой для сырых, особо сырых и пыльных помещений, наружных установок и химических производств все еще дефицитны. Единые требования безопасности к электроприводам не разработаны. Наконец, недостаточен контроль за состоянием их заземления и зануления.

Электросварочные агрегаты. С электрооборудованием этих агрегатов связано значительно большее относительное число несчастных случаев, чем с электродвигателями и другим технологическим оборудованием. При этом на собственно сварщиков приходится меньше половины (42,1 %) всех поражений, происшедших на сварочных агрегатах, 8,6 % — на электромонтеров, 22 % — на бетонщиков, бурильщиков

и остальное — на представителей других профессий. Такое распределение по профессиям лиц, чья травма связана с электросварочным оборудованием, нельзя не поставить в связь с тем, что опасность, которую представляет собой напряжение ниже 65 В, недооценивается. Состояние изоляции соединительных проводов часто бывает неудовлетворительным, к аппаратам допускаются неспециалисты. Среди пострадавших оказались, например, главный механик хлебозавода, начавший сварку электродом с дефектной изоляцией, бухгалтер предприятия, пытавшийся заварить поломанный багажник своего велосипеда, комбайнер, школьники и т. п.

При каких обстоятельствах произошли эти поражения? В 58 % случаев они имели место в результате случайного соприкосновения с неизолированной частью электрода, в 19,9 % — при подключении, отключении и ремонте сварочных аппаратов без снятия напряжения, в 9 % — из-за отсутствия заземления при повреждении изоляции, в 8,3 % — из-за прикосновения к соединительному проводу с поврежденной изоляцией, в 4,8 % — от других причин.

В работе [27] показано, что 52 электротравмы за три года произошли вследствие неудовлетворительной конструкции электрододержателя и отсутствия автоматического отключения напряжения холостого хода.

Производственный травматизм на сварочных аппаратах можно снизить, если обзавестись гибкими, хорошо изолированными проводами достаточного сечения, специально предназначенными для передвижных аппаратов и установок. Следует добиться применения только безопасных электрододержателей с устройствами для автоматического снятия напряжения на холостом ходу.

Надо сказать и о том, что объем и методика профилактических испытаний сварочной аппаратуры нуждаются в пристальном внимании эксплуатационного персонала. Главное тут в том, что сварочные установки (как и другие передвижные установки) следует проверять и испытывать вместе с соединительными проводами и электрододержателями.

Высокочастотные установки. Как уже указывалось, на одну высокочастотную установку приходится в 118 раз больше поражений, чем на один электропривод. В 42 % случаев поражения явились результатом прикосновения к токоведущим частям при неснятом напряжении и выведенной из действия защитной блокировке, причем в 25 % случаев это сделали сами пострадавшие. В 1975—1988 гг. поражений вследствие вывода из действия защитной блокировки было 70,1 %. Характерно, что 14,3 % несчастных случаев имели

место при ремонте генератора под напряжением; 12,2 % поражений произошло из-за отсутствия заземления или его обрыва, в то время как металлические части, доступные для прикосновения, находились под напряжением; 4,5 % поражений были вызваны прикосновением к неразряженным конденсаторам. Зарегистрировано несколько травм с летальным исходом на высокочастотных терапевтических аппаратах. Во всех случаях жертвами стали опытные работники, не один год обслуживавшие их.

Причины большого электротравматизма на высокочастотных установках заключаются в их конструктивных недочетах и в неудовлетворительной организации их эксплуатации. В частности, ненадежная блокировка генераторных шкафов облегчает доступ к токоведущим частям, а прикосновение к ним было причиной ряда смертельных поражений.

Использование токов высокой и сверхвысокой частоты — характерная черта новой технологии. Число установок, в которых применяются такие токи, будет нарастать. В цехах будет появляться к тому же все больше аппаратуры разных систем напряжения и разных родов тока, причем обслуживать всю эту далеко не простую технику чаще всего придется технологическому персоналу — лицам неэлектропрофессий. Все это делает насущно необходимым серьезное улучшение конструкций, значительное повышение надежности изделий и элементов, входящих в комплект высокочастотных установок. Одновременно должна решаться и задача качественного улучшения их профилактических испытаний и ремонтов.

Подъемно-транспортные устройства. Эти устройства, в первую очередь краны и лифты, также относятся к оборудованию, на котором электротравматизм значителен. 54,5 % общего числа несчастных случаев, происшедших на подъемно-транспортных устройствах, были вызваны прикосновением стрелы подъемного крана к электрической линии, находившейся под напряжением; 29,2 % — соприкосновением с открытыми токоведущими частями электрооборудования (в основном при наладках и ремонтах); 9 % поражений имели место при выходе на крановую площадку при наличии напряжения на троллеях и отсутствии ограждений питающих щитов; 19,2 % общего числа пострадавших были крановщиками, 9,8 % — электромонтерами и 71 % — рабочими других профессий (слесари, грузчики, шоферы и т. п.).

Переносные электроприемники. На этих электроприемниках происходит много поражений. Анализируя их, нельзя не обратить внимания на два важных обстоятельства. Первое — недостаточно надежная изоляция. К сожалению, механически

прочная высококачественная изоляция типа фторопласта дорога и дефицитна. Нужна изоляция, обладающая свойствами фторопласта и в то же время дешевая, доступная для массового применения. Второе обстоятельство — неудовлетворительная система заземления. Это связано опять-таки с отсутствием в должном количестве гибких проводов, обладающих достаточной механической прочностью и высокими изоляционными качествами. В настоящее время для подключения чаще всего применяют провода, не предназначенные для питания передвижных и переносных электроприемников. Изоляция таких проводов быстро выходит из строя, поврежденные места изоляции во время ремонта плохо восстанавливаются, и при случайных касаниях возникает смертельное поражение, даже, как это нами наблюдалось, и при напряжении 36 В.

Главнейшие мероприятия, направленные на снижение производственного электротравматизма, возникающего на переносном оборудовании, сводятся к следующему: организация массового выпуска подключающих устройств, аппаратуры и кабелей, специально предназначенных для применения на этом оборудовании; проведение систематических профилактических ремонтов; тщательное инструктирование работающих и, наконец, существенное улучшение конструкций с использованием современных электроизоляционных материалов.

Электроосветительные установки. Об обстоятельствах поражения на этих установках свидетельствуют следующие данные (в процентах):

Прикосновение к цоколю или к стеклу лампы, загрязненному проводящим составом	24,2
Прикосновение к металлическому патрону, оказавшемуся под напряжением вследствие неудовлетворительной его зарядки	8,5
Прикосновение к токоведущим частям осветительной арматуры, подключающим устройствам, оболочкам проводов и кабелей, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции	15,4
Прикосновение к токоведущим частям при ремонте осветительной сети и арматуры под напряжением	26,6
Прикосновение к оголенному или голому проводу	10
Прикосновение к токоведущим частям, стене, полу, лестнице и т. д., оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции	8,0
Прикосновение к корпусу трансформатора напряжением 120/12 В и 220/12 В при повреждении изоляции	2,5
Прочие обстоятельства	4,8

Итого: 100,0

Большее половины общего числа поражений на электроосветительных установках произошло при смене ламп. А известно, что этим занимаются не только лица электропрофессий, но и люди самых различных занятий, подчас даже дети. Чтобы добиться снижения травматизма на осветительных установках, необходимо внедрять неметаллическую арматуру, запретить применение металлических корпусов патронов, улучшить конструкцию подключающих устройств. Надо покрывать металлическую осветительную арматуру надежным изолирующим лаком, практиковать профилактические испытания сети, широко пропагандировать правила, предупреждающие бытовой электротравматизм (лекции, популярные брошюры).

3.6. Распределение электротравм по времени суток и месяцам года

Некоторое представление о влиянии утомляемости на число электротравм и на тяжесть их исхода дает распределение несчастных случаев по часам суток (рис. 3.1). К сожалению, полнота данных, легших в основу этого рисунка, оставляет желать лучшего: далеко не во всех актах указано время происшествия.

Как видно из рисунка, характер изменения числа несчастных случаев по этому признаку различен в установках напряжением ниже и выше 1000 В.

Почасовая динамика несчастных случаев в установках напряжением ниже 1000 В, в общем, следует графику потребления электроэнергии. Имеют место «провалы» кривой несчастных случаев — ночной, дневной и вечерний, подобные «провалам» графика потребления. Ясно, что число поражений электрическим током в различное время суток зависит, во-первых, от числа лиц, по роду работы соприкасающихся с электрооборудованием, и, во-вторых, от числа оперативных переключений и включений (утренний пик). Большое число поражений перед обеденным перерывом и к концу смен позволяет предполагать, что возможной их причиной было снижение внимания и сопротивляемости организма в эти часы.

Иной характер носит распределение электротравм по времени суток в установках напряжением выше 1000 В. Кривая несчастных случаев здесь очень мало следует графику потребления энергии. В известной степени такое положение вытекает из того, что подавляющее число установок высокого напряжения обслуживается дежурным персоналом круглосуточно. Число несчастных случаев здесь непосредственно уже не зависит от числа оперативных переключений. Это объясня-

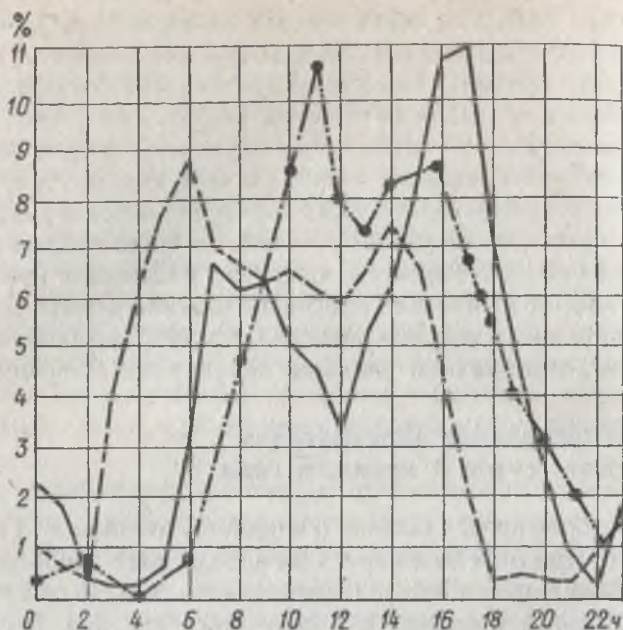


Рис. 3.1. Распределение электротравм по часам суток (в процентах к общему числу электротравм)

Сплошная линия — установка напряжением ниже 1000 В; штриховая линия — установки напряжением выше 1000 В; штрихпунктирная линия — без подразделения по значению напряжения

ется тем, что эти переключения являются для персонала, обслуживающего установки напряжением выше 1000 В, основным содержанием его деятельности. Можно предположить, что в часы максимального числа переключений оперативный персонал, занятый этими переключениями, работает с наибольшим вниманием. Основным же содержанием деятельности лиц, обслуживающих электроустановки напряжением ниже 1000 В, является работа на технологическом оборудовании, во время которой главное внимание направляется, как показали наблюдения, отнюдь не на включение и отключение электрических цепей. Понижение внимания к концу смены, по-видимому, и в установках напряжением выше 1000 В отражается на числе несчастных случаев.

Штрихпунктирной линией на рис. 3.1 показано распределение электротравм по часам суток, не дифференцированное по напряжениям. По своей форме эта кривая почти совпадает (как, впрочем, и следовало ожидать) со сплошной кривой, вычерченной для электротравм, происшедших при напряже-

нии ниже 1000 В, как более массовых. Общим является наличие спада в ночные часы и двух пиков в дневное время. Существенно лишь расхождение в величине двух дневных максимумов. На штрихпунктирной кривой максимум, приходящийся на первую смену, больше, а приходящийся на вторую смену — меньше, чем на сплошной кривой. По-видимому, это различие следует объяснить невысоким коэффициентом сменности на предприятиях, а также повышением числа электротравм в сельскохозяйственных установках, происходящих преимущественно в первую половину дня.

Неравномерное распределение электротравм по часам суток, особенно в пределах одной смены, с несомненностью указывает на ту большую роль, которую играет психофизиологическое состояние человека в возникновении электрической цепи через его тело, особенно если это связано с непосредственным нарушением инструкций или правил. По существу, большая часть нарушений правил эксплуатации и правил электробезопасности приходится на первые два часа после начала работы и на последние два часа перед окончанием смены. Статистика автомобильных катастроф, также с тяжелым исходом, имеет аналогичную закономерность, но более четко выраженную.

Если исключить преступную халатность (вождение машины в состоянии опьянения), то окажется, что водители транспорта, даже опытные, чаще всего нарушают правила в начале работы, которое можно назвать периодом вхождения в ритм или периодом адаптации, и в конце, когда сказывается утомление и, следовательно, наступает потеря ритма и ослабление внимания.

Существенное отличие между почасовыми распределениями электротравм и транспортных травм состоит в более непосредственном влиянии на исход электротравм фактора внимания.

Внимание человека, как это будет обосновано в § 6.2, само по себе создает оборонительную реакцию. На это указывает то, что при одних и тех же значениях напряжений и токов наступают столь различные исходы. При одном и том же напряжении установки в одном случае наступает смертельный исход, в другом человек испытывает только электрический удар. Даже без глубокого изучения очевидна роль нервной системы в исходе поражения. Поэтому при расследовании несчастных случаев особое внимание было обращено на выяснение роли и значения фактора внимания. Судя по обстоятельствам происшествий, в 84 % несчастных случаев, закончившихся летальным исходом, соприкосновение с токо-

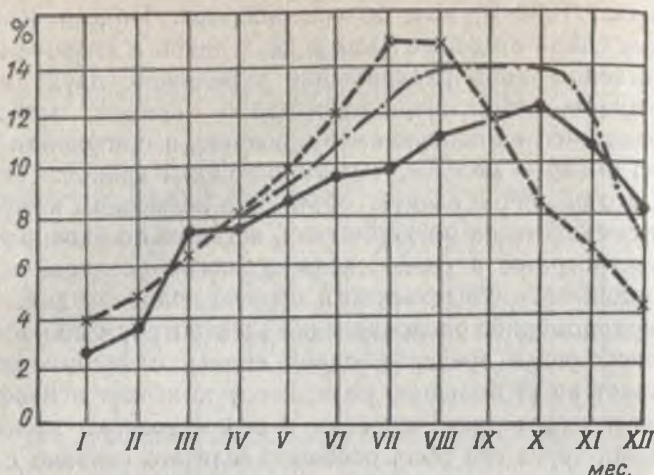


Рис. 3.2. Распределение электротравм по месяцам года (в процентах к общему числу электротравм)

Сплошная линия — данные по одному крупному промышленному району за 1972 г.; штриховая линия — данные за 1961—1966 гг.; штрихпунктирная линия — данные [19] за 1979 г.

ведущими частями происходило тогда, когда пострадавший не находился в состоянии направленного внимания. И лишь в 16 % случаев печальный исход наступал, несмотря на наличие фактора внимания.

При направленном внимании случаи смертельных поражений в сети напряжением ниже 1000 В редки, и если имеют место, то лишь при длительном нахождении пострадавшего в цепи тока.

Влияние фактора внимания на исход электротравмы отмечается и в отечественной [12], и в иностранной [см. табл. 2.1] литературе. Однако ни в одном из указанных источников не дано этому фактору исчерпывающего объяснения.

Анализ материалов несчастных случаев, проделанный нами, показывает, что эффективность действия тока определяется состоянием (реактивностью) организма, причем фактор внимания, по-видимому, нужно признать по значению одним из решающих для исхода поражения. Отсюда возникают серьезные задачи, стоящие перед лицами, изучающими и внедряющими научную организацию труда, а также перед конструкторами различного вида оборудования и лицами, ведающими его эксплуатацией.

На рис. 3.2 показано распределение числа электротравм по месяцам года. Наши данные относятся к 1982 г. и охваты-

вают один крупный промышленный район страны. Метеорологические характеристики этого года в данном районе были близки к метеорологическим характеристикам средней полосы Советского Союза. Обнаруженное возрастание числа электротравм в начале осеннего периода можно объяснить массовым возвращением людей из отпусков, а следовательно, недостаточной адаптацией к трудовому ритму, более интенсивной работой предприятий, обычной для второй половины года, неблагоприятными метеорологическими условиями (дожди, повышенная влажность). Общий вывод, который можно сделать, анализируя кривые, — большое число электротравм в летнее время, что, несомненно, связано с разворачиванием работ в сельском хозяйстве и в строительстве. Число электротравм в этих отраслях народного хозяйства существенно влияет на их общее распределение. На распределении электротравм по месяцам сказался и часовой сдвиг во времени в апреле и октябре.

Глава четвертая

ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ В КВАРТИРАХ, ДОМАХ И КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

4.1. Электротравматизм в квартирных электросетях

Начнем с определения. К квартирным электросетям относится проводка от предохранителей ввода в квартиру до электроприборов: светильников и приборов различного назначения. Спецификой квартирных сетей является единообразие с общими электропроводками и отличие в электроприборах. С массовым применением радиотехнического оборудования и телевизоров в квартирах появились электрические элементы самого различного напряжения, включая высокое. Появился детский электротравматизм в домашних условиях, и он высок — 16,3 % всех электротравм в быту. Электротравматизм детей школьного возраста составляет 8,9 %, дошкольного — 7,4 %.

Причины детского травматизма: отсутствие достаточного контроля за детьми, недооценка взрослыми опасности электричества, нарушение элементарных требований эксплуатации электрооборудования и проводки. Отдельную группу со-

ставляют подростки, монтирующие кустарные радиоприемники и электрифицированные игрушки.

Пример 4.1. Мальчик, оставленный без присмотра родителей, подтянул торшер к батарее парового отопления и коснулся его корпуса, который имел повреждение электроизоляции, и батареи. Мальчик погиб.

Пример 4.2. В телевизоре появились неполадки: нарушение нормального соотношения цвета, импульсных разрядов и т. д. Владелец телевизора, инженер-радиотехник, снял заднюю крышку и начал устранять имеющиеся, по его мнению, неисправности. Закончив работу, но не вынимая рук из телевизора, он попросил жену включить для опробования штепсельную вилку шнура телевизора в розетку. В момент включения он вскрикнул. Жена выдернула вилку из розетки, но было уже поздно — владелец телевизора был мертв.

Случаи со смертельным исходом при квартирном ремонте телевизоров, радиоприемников, видеоманитов описаны в книге Л. И. Вайнштейн «Электробезопасность в жилых зданиях» (М., 1983).

Насчитывается немало детских электротравм, происшедших при использовании удлинителей. Эти электротравмы становятся типовыми. В подавляющем большинстве случаев вторым полюсом касания являются радиатор теплоснабжения и водопроводная труба.

Зарегистрированы смертельные поражения электрическим током при использовании самодельных электронагревательных приборов, и, опять-таки, большинство из них происходит из-за касания тепловых калориферов.

А вот случай, приведенный Л. И. Вайнштейн в ее книге.

Пример 4.3. «В пос. Ларино Донецкой области учащийся техникума Олег Г. установил в умывальнике ванной комнаты электроплитку кустарного изготовления. Кастрюля с водой, стоящая на плитке, коснулась водопроводного крана. Металлическая связь корпуса ванны с водопроводом отсутствовала. В результате пробоя электроизоляции на электропроводке водопроводная труба оказалась под напряжением. Моесь в ванне, Олег взялся за водопроводный кран и был поражен электротоком.»

Следует отметить ряд электротравм в сетях 380/220 В вследствие порчи изоляции стиральных машин. К сожалению, в паспорте на электрическую стиральную машину нет указаний на необходимость систематических проверок состояния изоляции относительно корпуса.

Широко развито применение электроутюгов. Ориентировочно можно полагать, что в эксплуатации у населения СССР находится примерно более миллиона утюгов. Утюги можно

разделить на две группы: утюги со встроенной розеткой и переносным шнуром питания и утюги без питающей розетки, подключаемые к любой квартирной розетке идущим от утюга шнуром. Безусловно, второй тип утюгов более надежен в эксплуатации, легко поддается контролю. Однако смертельные поражения были от утюгов той и другой конструкции: на утюгах со встроенной розеткой и на утюгах с непрерывным шнуром. Следует учесть, что необходимо коренным образом повысить требования к изоляции вывода проводов из утюгов, ибо температура утюга так или иначе изнашивает изоляцию. Проверка изоляции ряда утюгов, находящихся в эксплуатации 2—3 года, показала, что по сравнению с заводскими данными за этот срок ее качество снизилось на 40—50 %. Особенно настораживает в этих электротравмах то, что, пользуясь утюгом, можно коснуться металлических частей его, оказавшихся над поврежденной изоляцией. Акупунктурная зона на теле человека между большим и средним пальцем наиболее чувствительна к воздействию током. Следует отметить, что при пользовании утюгами иностранной конструкции подобных электротравм не зарегистрировано. Улучшение качества изоляции в выходных устройствах — вот надежный путь устранения смертельных поражений.

Пример 4.4. Среди этих электротравм была одна, при которой женщина упала, потеряла сознание, но пришла в себя. Удар электрического тока оставил характерную отметку.

Повышение надежности выходных устройств бытовых приборов должно привлечь внимание выпускающих их предприятий, ибо бессмысленная гибель людей недопустима.

Пример 4.5. «В д. Широково Пермской области пенсионерка Р. И. Рябкова при попытке у себя дома переставить не отключенную от сети электропечь кустарного производства коснулась одновременно обеими руками оголенных контактов (фазового и нулевого) в месте присоединения шнура к электропечи и была травмирована».

Немало случаев поражения, в том числе детей, происходит при применении вместо стандартной штепсельной вилки обнаженных проводов. К этой группе поражений относятся и детские поражения.

Каковы же причины травматизма? Обобщая собственные и литературные данные о травматизме, можно назвать следующие: применение в квартирных электросетях оборудования с дефектной изоляцией, отсутствие контроля за состоянием электрооборудования (органы энергонадзора не обслуживают квартирные и домовые электросети), недостаточное зна-

комство населения с возможными опасностями поражения электрическим током.

Настало время включить в технические требования при строительстве новых домов защиту паропроводных сетей (батарей парового отопления) от возможности прикосновения к ним. Ввиду того что электротравматизм в бытовых и коммунальных сетях возрос, необходимо создать специализированную организацию по профилактическому ремонту и контролю состояния бытовых электроприборов. Электропромышленным предприятиям, выпускающим бытовое электрооборудование, следует повысить требования к надежности изоляции, исключающей возможность возникновения электрической цепи при ее повреждении. В некоторых случаях в сетях 380/220 В должны быть ужесточены требования к изоляции — сопротивление изоляции увеличено в 1,5—2 раза при соответствующей надежности в процессе эксплуатации.

4.2. Домовые электросети

Опять начнем с определения. К домовым электросетям следует отнести электропроводку, питающуюся от трансформатора и простирающуюся до домового распределительного щита типа ЩС и ввода в квартиру.

К этой группе следует отнести так называемые квартирные временки, например временно подключаемый насос для откачки воды из подвалов, временное освещение объектов ремонтных и строительных работ и, наконец, временно подключаемые светильники для освещения подлежащих ремонту помещений. И здесь основная причина поражений (а их было немало) заключалась в том, что подключаемое оборудование не имело достаточно надежной изоляции корпуса электродвигателей (используемые в насосах электродвигатели не заземлялись). Покажем это на примерах.

Пример 4.6. В одном из капитально отремонтированных домов старого фонда был подключен насос, с помощью которого шлангом через окно подвала откачивали воду. В процессе откачки обслуживающий насос работник удалился, оставив без присмотра работающий механизм. Один из прохожих, проходя мимо насоса, коснулся корпуса металлической конструкции и был смертельно поражен током. Дело в том, что насос помещался на раме тележки, имеющей резиновые пневматические шины. Корпус насосной системы и вся конструкция насоса при повреждении электроизоляции не отключались, а находились под напряжением, что привело к появлению напряжения между корпусом и землей. Никакой сигнализации о появлении напряжения на корпусе не было.

Пример 4.7. Шестизэтажный многоквартирный дом находился, как говорят строители, на полной реконструкции, со сменой потолочных и половых перекрытий. Один из строителей коснулся стены и был смертельно поражен электрическим током. Его смерть была настолько неожиданной, что вызвала длительное медицинское расследование. Однако итог расследования четко показал, что смерть вызвана электрическим током. Оказалось, что бывший владелец квартиры сумел сделать скрытую проводку, подключив ее к сети следующего дома. Использовал он ее для электрического обогрева помещения. Ориентировочно было определено, что оплачивалось всего 10—15 % истраченной энергии. Незаконно выполненная проводка была некачественной. «Хищник» был установлен и привлечен к уголовной ответственности «за поставление людей в жизненно опасную ситуацию». Объем хищений установить не удалось. В приговоре суда значилось: «Попытка хищения». Суд ограничился большим штрафом и условным приговором к трем годам лишения свободы.

Пример 4.8. Происходил демонтаж старой электросети при подготовке дома к капитальному ремонту. Напряжение полностью не было снято, и провода оказались под напряжением, хотя персонал был извещен, что напряжения там нет. В результате один из рабочих получил смертельный удар электрическим током, что было подтверждено тщательно проведенной экспертизой.

Пример 4.9. Дом находился на капитальном ремонте. На территории были выставлены деревянные ограждения, выполненные из досок. На углу ограждения, на одной из досок, был повешен электрический фонарь, питающийся от сети 380/220 В. Фонарь крепился к ограждению питающим проводом. В процессе капитального ремонта (а он продолжался долго) изоляция провода, крепящего фонарь, при его раскачивании ветром оказалась поврежденной и голый провод соединялся с доской. Электрическое сопротивление доски ограничило ток короткого замыкания, и при касании голого провода доски предохранитель сработать не мог. Подросток в сырую погоду коснулся доски ограждения и получил электротравму со смертельным исходом. Оказывается, на большом расстоянии от фонаря доска была под напряжением. Произошел лишь один несчастный случай. Их могло быть значительно больше. В суде возникла проблема: кого судить? По правилам технической эксплуатации ответственность несет лицо из административно-технического персонала, которому подчинен пострадавший. Но пострадавший подросток ни в чьем подчинении не находился. Учитывая возможность массовых электротравм, суд вынес приговор по статье 140 Уголовного кодекса, части третьей электрику РЖУ, который допустил грубые нарушения при устройстве защитного освещения.

Абсолютно необходимо создание бригад из квалифицированного электроперсонала для эксплуатации домовых электросетей, роль которых особенно важна при капитальном ремонте зданий. На эти бригады должна быть возложена обязанность контроля за системами временного электроснабжения, обеспечивающими ремонтные работы строителей. По-

добные случаи поражения током говорят о том, что домовые сети временного электроснабжения, по существу, превращаются в очаг электротравматизма. Напомним, что под очагом электротравматизма следует понимать повторные электротравмы, возникающие при аналогичных условиях.

Должны быть широко опубликованы памятки владельцам квартир о тех мероприятиях, которые следует выполнять при эксплуатации электробытовых установок не только временно-го электроснабжения. Институт охраны труда ВЦСПС — одна из организаций, которая могла бы создать эту крайне необходимую населению памятку.

4.3. Коммунально-бытовые сети

К коммунально-бытовым электросетям относятся электросети мелких мастерских, магазинов, общежитий. Здесь имеется своя специфика. Приведем следующие примеры.

Пример 4.10. В одном из общежитий ПТУ комендант во избежание перемещения железных кроватей в спальнях помещениях распорядился прибить их к полу с помощью специальной накладки, закрепленной с одной стороны к ножкам кровати, а с другой — гвоздем к полу. При закреплении никаких особых жалоб не было. Однако произошло следующее. Гвоздем был поврежден проходящий под полом кабель, но короткого замыкания не произошло. Кровать находилась под напряжением, как потом выяснилось, около 100 В и была расположена вблизи батареи парового отопления. На кровати спал учащийся. Однажды ночью, вставая, он одной рукой коснулся батареи, а другой — спинки кровати и погиб.

Пример 4.11. В одном из магазинов был использован электрополотер, который вместо обычной розетки подключался к общему щиту, питающему соседние магазины. В момент подключения электрополотера с поврежденной изоляцией один из покупателей коснулся металлических частей витрины, представляющих собой естественный «заземлитель», оказался под напряжением и был смертельно поражен током.

4.4. Электротравматизм в сетях наружного расположения

Сюда относятся электросети сельской местности, на садовых участках и т. д. Основной причиной электротравм является касание оборванного провода. Поражение людей при прикосновении к упавшим проводам составляет примерно 15 %. Приведем примеры.

Пример 4.12. «В г. Молтань Марийской АССР сильным ветром был оборван провод ВЛ 0,38 кВ. Конец его лежал на земле под

напряжением. Девочка 10 лет, проходя мимо, коснулась свисающего провода и была смертельно поражена».

Пример 4.13. «В г. Благовещенске Саша (8 лет) в нерабочее время проник в цех железобетонных изделий УПКТ «Амурремстроя», поднялся по лестнице на посадочную площадку мостового крана, перелез через ограждение и по мосту крана дошел до сетчатого ограждения троллея, перелез через него и, коснувшись троллея, находящегося под напряжением, получил смертельную травму. Мальчик направлялся к птичьему гнезду, находящемуся над троллеями, с которых по окончании работы крана не было снято напряжение. Подобная небрежность, недопустимая на предприятии, способствовала возникновению электротравмы».

За пятилетие, с 1982 по 1987 гг., были смертельные поражения от воздушных бытовых сетей 380/220 В, распространенных в небольших городах, поселках и селах. Если обобщить наиболее характерные случаи, то примером может служить подъем упавшего провода, касание к которому не приводит (благодаря большому переходному сопротивлению провод — земля) к короткому замыканию и отключению сети. Это относится и к сетям, имеющим изоляцию типа ПР, и голым проводам. На возможное снижение поверхностной изоляции до последнего времени не обращалось внимание. Обычно эти электротравмы получают люди, не имеющие прямого отношения к электротехнике. Особенно следует обратить внимание на начало широкого применения водяных насосов типа «Кама». Эти насосы иногда находятся в колодцах, т. е. постоянно в воде. Конечно, в них приняты меры, повышающие безопасность эксплуатации, однако избежать случайных повреждений не удастся. Эти электротравмы особенно должны привлечь внимание, опять-таки, заводоизготовителей, если учесть особо опасные условия работы подобного электрооборудования.

Пример 4.14. Следует привести пример, который, к счастью, не окончился смертельным исходом. Владелец участка решил подключить дрель, с которой он работал, к электросети. Для этого он поставил лестницу к стене дома. В момент подключения коснулся открытой токоведущей части и упал в бессознательном состоянии. Очнувшись после падения, сообщил, что он почувствовал сильнейший удар в голову и в сердце. Падение, по-видимому, его спасло.

При временном подключении дрели ее корпус оказался под напряжением, работающий с ней владелец участка не сразу коснулся места поврежденной изоляции. Своевременная помощь случайно оказавшегося на месте происшествия врача позволила избежать смертельного исхода. Однако на теле пострадавшего осталась метка. Необходимо отметить, что пострадавший через полгода умер. Смерть была загадочной и непонятной. Судебно-медицинский эксперт совер-

шенно правильно отметил, что причиной неожиданной смерти от остановки дыхания явилось отдаленное последствие травмы.

Пример 4.15. «В г. Ляппясюръя Карельской АССР Сережа К. (15 лет) при раздаче корма животным в хлеву коснулся рукой провода (на потолке высотой 2 м) с поврежденной электроизоляцией и был поражен электротоком. Электрическая проводка была некачественно выполнена хозяином дома: на высоте 2 м от пола она была прибита гвоздями к деревянному основанию, несколько соединений выполнены скруткой и покрыты изоляционной лентой, а в одном месте, которого и коснулся юноша, изоляция была разорвана на расстоянии 6 см».

Пример 4.16. В г. Мга Качура Алеша (8 лет) схватил рукой оборванный провод опоры. Был смертельно поражен током. Нашли в канаве.

Обращает внимание появление бытовых электротравм в сетях временного электроснабжения автолюбителей. Находясь под машиной для ремонта и осмотра, автолюбитель пользуется переносной лампочкой 220/380 В. Пожалуй, здесь наиболее правильным решением является применение светильников, работающих от аккумуляторов автомобиля.

Сравнивая бытовой электротравматизм за рубежом и у нас, приходится констатировать, что в СССР он значительно больше, чем за рубежом, и, что особенно досадно, происходит с персоналом электротехнических специальностей: инженерами-электриками, техниками.

За последние годы издательством «Энергоатомиздат» выпущен ряд научно-популярных изданий [5, 21, 44, 45, 79] об опасности электрического тока и мерах защиты от поражений.

В указанной литературе приводятся правила, применение которых повышает надежность работы электросетей и электрооборудования. Однако сама опасность электрического тока не раскрывается, что значительно снижает эффективность неплохо подобранных в этих работах материалов.

4.5. Поражения электрическим током в быту

Рассмотрев состояние электротравматизма в домовых, квартирных и коммунальных сетях, можно обобщить его одним понятием «электротравматизм в быту», значительно расширяя его по сравнению с существующим представлением.

Бытовой электротравматизм — большое место современной цивилизации. Ни одна из капиталистических стран, даже развитых, где уровень технической культуры и образованности населения сравнительно высок, не сумела добиться безопасного использования электричества в быту. В Австрии, например, число электротравм со смертельным исходом из

года в год остается неизменным и составляет примерно 5—6 случаев за год при соотношении между производственными и бытовыми электротравмами, равном 50:50. В 1979 г. это равенство было нарушено: две трети смертельных электротравм произошли в быту и лишь одна треть — на производстве [116]. Местные авторы объясняют это тем, что изоляция у бытовых приборов менее надежна, чем у промышленного электрооборудования. Разрыв между числом производственных и бытовых электротравм ощутим и все больше увеличивается.

Нарастает количество бытового электрооборудования, находящегося в эксплуатации, и у нас. Если сосчитать все телевизоры, холодильники, электробритвы, электрогазовые зажигалки, электрифицированные игрушки и другие электроприборы, имеющиеся в домах только одного квартала современного города, то окажется, что по своему числу и по своей суммарной установленной мощности они превосходят электрооборудование завода или фабрики средней величины. Но если на любое предприятие распространяются требования о специализированном надзоре за выполнением правил по охране труда и электробезопасности, причем надзор этот осуществляют сотрудники энергоинспекций, технические инспектора профсоюзов и другие специалисты, то эксплуатация бытового электрооборудования является уделом исключительно самих квартиросъемщиков и комендантов общежитий, т. е. лиц, не имеющих специальной классификационной группы по электробезопасности. Состояние электросетей жилых помещений проверяется только при их сдаче строителями после сооружения или капитального ремонта. Организации Рембыттехники, телерадиомастерские осуществляют ремонт, как правило, лишь после прихода оборудования в аварийное состояние. К тому же ответственности за некачественный ремонт, в результате которого может возникнуть электротравма, практически никто не несет.

Работники коммунальных электросетей за последние годы проделали значительную работу по повышению надежности бытовых электросетей. Улучшилось качество изоляции бытовых электроприборов. Среди последних немало таких, длительная эксплуатация которых не сопровождается электротравмами. В качестве примера назовем электробритвы, подключаемые к сети 220 В. Их в ходу миллионы, и, к счастью, ни одной травмы! Улучшилась изоляция и подключающих устройств (штепсельные розетки, вилки и т. д.).

Наряду с этим имеются десятки таких видов электрооборудования, эксплуатация которых сопровождалась электро-

травмами, подчас с тяжелыми исходами. В целом бытовой электротравматизм в 80-х годах увеличился и, что крайне тревожно, значительно возросло число электротравм, жертвами которых стали дети, даже очень маленькие. Причины этого кроются в существенных недостатках изоляции проводов переносного электрооборудования, в эксплуатации устаревших по конструкции штепсельных розеток и вилок, в продаже населению электрооборудования, неудачного по своей конструкции и обладающего недостаточно прочной электроизоляцией, наконец, в производстве ремонта даже сложного электрооборудования лицами неэлектропрофессий. Последнее прежде всего относится к кустарному ремонту телевизоров, радиоприемников, стиральных машин, питающихся от сети 220 В.

Отмечено множество случаев грубого нарушения правил устройства электрооборудования при временном его подключении, особенно электроосвещения елок, переносных ламп и т. д. Зарегистрирован ряд электротравм с тяжелым исходом у студентов, живущих в общежитиях. Совершенно недостаточна информация населения о необходимости квалифицированного обслуживания бытовых электроприборов.

Заметим, что за эксплуатацией автотранспорта, находящегося в личном пользовании у населения, осуществляется строгий и систематический надзор автоинспекцией. Почему же эксплуатация потенциально опасной бытовой электротехники, предназначенной для населения, не находится под надзором государственных и общественных организаций? С такой беспечностью далее мириться нельзя!

Конечно, осуществить надежный поквартирный электронадзор — дело непростое. И затруднения здесь не только организационные. Одна из трудностей состоит в отсутствии единого представления о механизме поражения электрическим током и об опасных параметрах последнего, а отсюда и в отсутствии строгих и достаточно обоснованных нормативов по качеству бытового электрооборудования.

Чтобы показать, насколько нестандартны ситуации, при которых возникают бытовые электротравмы, приведем несколько примеров, часть которых почерпнута из содержательного труда А. Н. Орлова и его соавторов [53]. При этом не ограничимся описанием технической стороны дела, а приведем и некоторые данные медицинского характера, что будет, на наш взгляд, весьма поучительно.

Пример 4.17. Администрация вуза разместила в подвальном помещении одного из своих студенческих общежитий стиральные машины марки СМР-1,5.

Это — машины индивидуального пользования, предназначенные для эксплуатации в обычных квартирах, имеющих изоляционные полы. Здесь же эти машины были установлены на постоянно влажном электропроводящем полу. К тому же гарантийный срок их работы истек даже применительно к квартирным условиям. При пользовании одной из этих машин студентка Г. погибла.

Техническая экспертиза тщательно изучила обстоятельства поражения. (Выводы комиссии по определению лиц, ответственных за допущенные нарушения требований эксплуатации электрооборудования, приведены в § 16.4.) Установлен дефект изоляции одной из втулок крепления электродвигателя к раме. К тому же вместо четырех болтов, как это предусмотрено заводом, имелось лишь три болта. Это порождало вибрацию, снижавшую сопротивление изоляции; на ряде проводов оно было близко к нулю. Снижение сопротивления изоляции привело к появлению напряжения между корпусом машины и проводящим полом (напряжение сети 220/127 В). Моделирующим экспериментом было установлено, что между корпусом и полом напряжение находилось в пределах 30 — 50 В. Подобное напряжение появлялось и на других стиральных машинах, находящихся в том же помещении, на что студенты, пользовавшиеся ими, неоднократно, но безуспешно обращали внимание администрации. Смертельное поражение студентки Г. произошло в момент, когда она правой рукой коснулась мокрого корпуса машины. Судебно-медицинский эксперт охарактеризовал результаты вскрытия как классический случай гибели человека от электрического тока.

Пример 4.18. Случай смертельного поражения током при работе на стиральной машине произошел и в другом общежитии со студентом П. Машина находилась в более благоприятных условиях — на третьем этаже здания, но, как и в предыдущем случае, в сыром помещении. Изоляция и тут была дефектной. Электрическая цепь возникла также через правую руку пострадавшего. И здесь судебно-медицинский эксперт обнаружил следы тока между первым (большим) и вторым (указательным) пальцами, полнокровие внутренних органов, следы точечных кровоизлияний на поверхности сердечной мышцы — словом, те же характерные признаки электротравмы.

Из этих двух примеров с очевидностью вытекает, что заводам-изготовителям необходимо решительно повысить требования к изоляции всех узлов и цепей стиральных машин, включая и окраску корпусов, а администрации общежитий и органам энергонадзора — усилить контроль за состоянием стиральных машин, их размещением в помещениях и эксплуатацией.

Пример 4.19. Зарегистрирован ряд электротравм, в том числе и со смертельным исходом, при пользовании таким на первый взгляд безобидным прибором, как электрическая зажигалка для газовой плиты. Возникают эти травмы при необходимости зажечь одну за другой две горелки. Если сначала зажигается дальняя горелка, а уже

затем ближняя, то никакой опасности нет, но если избирается иная последовательность действия (а это бывает сплошь и рядом), то электропровод зажигалки проносится над уже зажженной горелкой, пламя которой повреждает изоляцию провода, и человек, держащий зажигалку, подчас оказывается в электрической цепи, возникающей через весьма чувствительную к току поверхность ладони между большим и указательным пальцами.

Вывод ясен: либо изоляция электрозажигалки должна быть выполнена из нагревостойкого материала, хотя бы на участке, прилегающем к ее корпусу, либо сам корпус должен быть конструктивно изменен. Одно из технически простых решений могло бы состоять в совмещении поворота ручки горелки с включением электрозажигания, встроенного в газовую плиту. Реализовать это предложение, на наш взгляд, не составит труда.

Пример 4.20. Домохозяйка С., вымыв пол, решила ускорить его высыхание, для чего включила электрообогреватель. Изоляция провода на вводе его в вилку была оголена. В момент включения вилки в штепсельную розетку С., стоявшая босиком на мокром полу, была смертельно поражена током.

Пример 4.21. Уходя из дому, родители разрешили своему малолетнему сыну включить, если ему будет холодно, электрокамин. Мальчик, сидя верхом на камине, вставил вилку в штепсельную розетку и получил смертельное поражение, ибо металлического каркаса камина касалась греющая спираль. Электрическая цепь через тело мальчика составила из влажной одежды и левой ладони, которой тот касался батареи парового отопления в месте, где окраска ее была повреждена. Электрометок на теле не обнаружилось. В данном случае причиной гибели была неудачная конструкция нагревательного элемента.

Замена внешних металлических каркасов осветительных патронов пластмассовыми практически устранила электротравмы, связанные с поражением током при попытках заменить вышедшую из строя лампу. Лишь в редчайших случаях они возникают теперь при ввинчивании лампы в патрон мокрыми руками. Исчезли довольно частые прежде электротравмы при пользовании выключателями с металлическими кожухами. Теперь в ходу лишь пластмассовые кожухи. Источником электротравм остается еще вилка штепсельной розетки переносных бытовых приборов. Конструктивное выполнение ее по типу вилки для электробритв несомненно устранил и эти поражения.

Возросло число электротравм при кустарном ремонте бытовой телерадиоаппаратуры.

Пример 4.22. Гр. К., 22 лет, был доставлен в клинику через два часа после травмы. Во время грозы он пытался отключить антенну от

приемника. В этот момент молния ударила в антенну и вдребезги разбила наушники. Пострадавший не потерял сознания, он ясно ощутил боль по ходу тока вдоль правой половины тела. Общее состояние было удовлетворительное. На передней поверхности верхней трети правого бедра появились два небольших темных струпа по 1,5 см в диаметре, безболезненные, с незначительной гиперемией по их окружности. Выписан из клиники через 10 дней на амбулаторное лечение.

Пример 4.23. Санитарный техник Я., 29 лет, ремонтировал в подвале трубу парового отопления. Пол подвала был залит водой. Пострадавший был обут в резиновые сапоги, так как по роду службы ему приходилось часто работать во влажных помещениях с сырым полом. Для освещения места аварии он взял лампу и случайно коснулся рукой обнаженного участка шнура. Почувствовал действие тока, но не мог разжать пальцы, захватившие шнур. Успел закричать и потерял сознание. Находившийся рядом товарищ выдернул вилку из штепсельной розетки. Через 20 мин после травмы врач «Скорой помощи» ввел пострадавшему внутривенно 2 мл кордиамина и 2 мл 1 %-ного раствора димедрола. Пострадавший был госпитализирован в удовлетворительном состоянии. На ладонной поверхности левой кисти, у основания четвертого пальца и в области третьей межпальцевой складки, заметны электрические знаки. Через 4 дня выписан на амбулаторное лечение.

Пример 4.24. Учащийся К., 15 лет, был доставлен в клинику с электротравмой легкой степени. Дома во время ремонта радиоприемника случайно дотронулся пальцами правой руки до оголенного провода, включенного в обычную осветительную сеть напряжением 220 В. Сидел на стуле, прислонясь спиной к отопительной батарее. По словам пострадавшего, его сильно «затрясло». Хоть и с трудом, но он разжал пальцы, охватившие провод, и оторвался от него. Сознания не терял, но чувствовал головокружение. Ночь провел беспокойно, болела голова. При обследовании через 14 ч после травмы отмечалось некоторое повышение тонуса мышц нижних конечностей и ограничение активных действий в коленных и голеностопных суставах. Знаков тока на кистях и на других участках тела не обнаружено. Проведено симптоматическое лечение. Выписан из клиники на амбулаторное лечение в удовлетворительном состоянии через 7 дней.

Пример 4.25. Играя во дворе после дождя, мальчик У. наступил на поврежденный провод от сети 220 В и тут же скончался.

Пример 4.26. Мальчик Ш., 11 лет, вбежал на коньках к себе в квартиру и нечаянно повредил коньком изоляцию лежавшего на пороге провода. Пораженный электрическим током, он упал и на глазах у родителей тотчас умер. Оказалось, что на полу был из соседней квартиры протянут шнур-удлинитель переносной лампы для освещения лестничной клетки, где монтер устранял какую-то неисправность в распределительном щите. Одежда и обувь мальчика были мокрыми от снега.

Пример 4.27. Врач С., 25 лет, во время грозы сидел в закрытом сухом помещении, был поражен электричеством, упал и потерял сознание. На протяжении двух часов ему производили искусственное

дыхание. Придя в себя, он, как врач, подробно изложил историю своей болезни. На стене, на расстоянии 25—30 см от его спины, висели радионаушники. Контакта у него ни с наушниками, ни со стеной не было. Разряд молнии пришелся на радиопровод, который был протянут на дачу по деревьям. Искровой разряд молнии прошел через правое плечо. На ногах сидевшего были сапоги с металлическими подковами на каблуках. Несмотря на отсутствие непосредственного контакта с землей (ногами он упирался в перекладину деревянного стола), возник пробой воздушного слоя, отделявшего ноги от земли. В трех соседних дачах видели, как из штепсельных розеток радиопровода вырвались снопы искр. В течение нескольких часов после электрошока у пострадавшего наблюдалась полная потеря чувствительности кожного покрова всего тела, за исключением левой половины грудной клетки. Другим последствием травмы был распространенный ожог кожи на задней поверхности грудной клетки и в поясничной области. По этому поводу пострадавший находился на излечении в больнице 4,5 мес. В продолжение многих лет затем у него отмечалась слабо выраженная неравномерность сухожильных рефлексов.

Пример 4.28. Мальчик А., 11 лет, поступил в клинику на 10-й день после тяжелой бытовой электротравмы, сопровождавшейся электроожогом правой руки, правой ноги и правой половины грудной клетки. Общая площадь поражения составила 36 % поверхности тела. В момент поступления у больного было выявлено кровотечение из мышечных артерий бедра, которое было остановлено перевязкой кровоточащих сосудов в ране. Тут же были наложены две провизорные лигатуры на бедренную артерию, так как внешне конечность казалась жизнеспособной. Вечером этого же дня возникло обильное кровотечение из бедренной артерии (кровопотеря составила около 600 мл), которое было остановлено затягиванием провизорных лигатур. На 12-й день с момента травмы была произведена ампутация правого бедра с перевязкой наружной подвздошной артерии. В дальнейшем стал прогрессировать некроз мягких тканей и создавалась угроза вторичного кровотечения, была произведена превентивная перевязка подключичной артерии и вены.

Через 24 дня после травмы возникло вторичное кровотечение из правой подвздошной артерии, которое было остановлено путем перевязки артерии в ране.

В последующем были выявлены перитонит и сепсис. Мальчик погиб. Причиной смерти явилось поражение электрическим током, сопровождавшееся омертвением правых верхней и нижней конечностей, сепсисом, расплавлением желчного пузыря и перитонитом.

Пример 4.29. Годовалая девочка Л. была доставлена в клинику через 7 дней после электротравмы. Она взялась ручкой за оголенный в некоторых местах провод, шедший к переносной лампе, находившейся под напряжением 220 В. Со слов родителей, ребенок сознания не терял.

При обследовании в клинике патологических изменений со стороны внутренних органов, крови и мочи не выявлено.

Местно: в области вторых и третьих пальцев обеих кистей на ладонной поверхности выявлены участки некроза черного цвета. Через

8 дней после травмы на очередной перевязке началось кровотечение из артерии второго пальца правой кисти, которое было остановлено прошиванием сосуда в ране. В дальнейшем была произведена экзартикуляция ногтевой фаланги того же пальца. После образования хорошей грануляции рана культи второго пальца была закрыта кожным свободным аутотрансплантатом. Выписана по выздоровлении.

Пример. 4.30. Рабочий Б., 38 лет, поступил в клинику через час после электротравмы, которая произошла во время работы (случайно коснулся правой рукой домового рубильника, находившегося под напряжением 380 В). Сознания не терял.

При осмотре в клинике замечено: сознание ясное, в окружающей обстановке ориентируется, сонлив. Пульс 76 ударов в 1 мин, ритмичен. Артериальное давление 100/50 мм рт. ст. Тоны сердца — чистые, слегка приглушены. Число дыханий 20 в 1 мин. Со стороны органов пищеварения патологических изменений не отмечено. При исследовании крови и мочи патологических элементов не выявлено.

Местно: на ладонной поверхности правого лучезапястного сустава и у основания первого пальца кисти участок глубокого некроза размером 6×5 см зелено-серого цвета. Отмечается потеря чувствительности на ладонной поверхности первого, второго и третьего пальцев правой кисти.

После проведенных в клинике срочных мер (введение сосудорасширяющих средств, 40 %-ного раствора глюкозы, согревание) состояние больного улучшилось, артериальное давление нормализовалось (125/60 мм рт. ст.). Через 19 ч после электротравмы омертвевшие ткани были иссечены, концы срединного нерва освежены и сближены капроновыми швами. Образовавшаяся рана оставлена открытой. Через 10 дней была произведена аутопластика сплошными кожными лоскутами.

На 50-й день после травмы больной был выписан из клиники с умеренным ограничением движений в правом лучезапястном суставе и в первом пальце [53].

Рассмотренные примеры электротравм показывают, что во многих случаях они приводят к весьма различным тяжелым исходам, последствия которых проявляются, как установлено, даже через 30 и более лет. Главное, что можно вынести из сопоставления наших собственных наблюдений с наблюдениями А. Н. Орлова, заключается в том, что при каждой бытовой (как и при промышленной) электротравме в той или иной степени поражается центральная нервная система. Это поражение является специфическим, обуславливающим длительные сроки лечения, в иных случаях и безуспешного.

Анализ бытового электротравматизма показывает, что он устраним. Доказательством этого служит отсутствие прямой связи между значительным увеличением электробытовых приборов и числом электротравм. Снижение, а в некоторых случаях и полная ликвидация электротравматизма в осветительных

сетях свидетельствуют о том, что успех приносят даже несложные мероприятия, такие, как внедрение электрообезопасной системы «вилка — штепсельная розетка», повышение требований к электроизоляции бытовых приборов и проводов бытового назначения.

Есть еще ряд несложных мероприятий, позволяющих снизить число несчастных случаев от электричества. Вернемся еще раз к отопительным батареям. По существу, прикосновение к батареям и водопроводным трубам, кранам можно рассматривать как прикосновение к одному из электродов, через который может возникнуть электрическая цепь. Такое рассмотрение значительно расширяет понимание возникновения электрической цепи через хорошо заземленный естественный заземлитель, каким является батарея. Еще раз подчеркнем необходимость двух следующих основных мероприятий: повышение значения электрической прочности всех элементов электрооборудования в быту и наличие конкретной службы или в отделе энергонадзора, или при райисполкомах, обеспечивающей хотя бы выборочным контролем надежность изоляции. В настоящее время в органах энергонадзора имеется отдел промышленных предприятий. Сюда входят строительные организации, торговые предприятия, учреждения и т. д. Должны быть созданы отделы, занимающиеся квартирными сетями. Одна из основных задач — разъяснение населению опасности электрического тока. О том, что это возможно, говорит опыт Болгарии и Японии. В этих странах есть годы, в которые не возникло ни одной электротравмы и отсутствуют электротравмы у лиц электрических профессий.

Бытовой травматизм может и должен быть ликвидирован.

Глава пятая

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТРАВМ

5.1. Методика

Многолетний опыт экспертизы электротравм показал, что, как бы пространна ни была техническая документация, составляемая по горячим следам происшествия, многие важные обстоятельства остаются в ней невскрытыми. Статистическая обработка даже весьма большого числа актов не компенсиру-

ет неполноты большинства их — отсутствия данных, например, о поражающем напряжении, вызвавшем электротравму, о роде и значении тока, о продолжительности его прохождения через тело пострадавшего.

Для выяснения истинной картины поражения материалы актов приходится дополнять данными инструментальных измерений, выполняемых в условиях, имитирующих обстоятельства поражения. Как уже упоминалось в § 2.3, в электрическую цепь вместе с телом человека оказываются включенными пол, обувь, одежда, которые, ограничивая ток, уменьшают напряжение, непосредственно поражающее человека. Поэтому крайне важно оценить соотношение между напряжением установки и поражающим напряжением. Установив это соотношение, можно предопределить направленность защитных мероприятий и расширить представления о механизме поражения человека электрическим током. Инструментальные измерения позволяют ответить на многие вопросы, касающиеся обстоятельств происшествия, в том числе и на затронутый выше вопрос о соотношении между напряжениями установки и поражающим.

Разработанная автором данной книги методика инструментального расследования электротравм и полученные с ее помощью результаты уже были предметом публикаций [16, 42]. Тем не менее, автор считает необходимым изложить здесь хотя бы в сжатом виде главное содержание этих работ.

Инструментальные исследования охватили все виды электрических поражений, а именно:

а) вызвавшие смертельный исход, инвалидность или временную нетрудоспособность (по поводу этих случаев обычно составляются акты);

б) не приведшие к временной нетрудоспособности, но потребовавшие оказания медицинской помощи (эти случаи, если и регистрируются, то, как правило, только в поликлиниках и на медпунктах предприятий);

в) не связанные по первоначальному исходу с нетрудоспособностью и потому нигде и никогда не регистрируемые (эти поражения, как было указано в § 2.3, носят название электрических ударов).

Электротравма, повлекшая за собой смертельный исход или длительную нетрудоспособность, является на предприятии серьезным событием. О ней немедленно извещаются судебно-медицинские органы, энергоинспекция, областные и центральные профсоюзные организации. К расследованию обстоятельств, при которых произошла травма, привлекаются, как правило, квалифицированные специалисты, но органи-

зовать более или менее углубленное изучение несчастных случаев сразу же после происшествия бывает нелегко, так как они происходят в любое время суток и к тому же нередко в отдаленных местах, а число лиц, компетентно занимающихся изучением электротравм, весьма невелико. Все же большинство тяжелых поражений расследуется своевременно, и нам удалось наладить получение отчетов об этих расследованиях от всех участвовавших в них официальных организаций.

Электрические травмы, вызывающие лишь кратковременную потерю трудоспособности, регистрируются и учитываются энергоинспекциями и инспекциями ЦК профсоюзов не систематически. Наиболее полные сведения об этих видах поражений можно получить от «Скорой помощи» и заводских поликлиник, куда нередко обращаются люди, почувствовавшие себя плохо после пребывания в электрической цепи, получившие легкий ожог или ослепленные дугой на короткое время. И хотя подавляющее большинство таких обращений не регистрируется в качестве электротравм, нам удалось, используя данные заводских медицинских учреждений и «Скорой помощи», собрать достаточно большой материал, характеризующий и эту группу поражений.

Намного хуже обстоит дело с получением данных об электрических ударах, поскольку они, как правило, не регистрируются, а во многих случаях и сознательно скрываются. Для того чтобы составить себе представление о масштабах и последствиях этого рода травм, пришлось в течение двух лет вести специальные исследования на четырех машиностроительных заводах. О методике проведения и результатах этих исследований будет подробнее сказано в § 5.5.

При всем многообразии исходов поражения электрическая цепь через тело человека подчиняется общим закономерностям. Поэтому и методика ее изучения должна быть единой. Между тем расследование несчастных случаев, хотя и проводится уже более 70 лет, но в разных местностях (а подчас и в одной местности, но разными людьми) по-разному.

Основные положения разработанной автором единой методики заключаются:

- а) в унифицированной системе регистрации исходных данных;
- б) в моделировании обстановки, в которой возникли электротравмы;
- в) в максимальном использовании инструментального метода для получения параметров электрической цепи, возникшей через тело человека.

Тщательное инструментальное изучение электротравм весьма полезно для разработки профилактических мероприятий. Вот почему целесообразно на примерах подробнее ознакомиться с практическими приемами расследований и с выводами, которые делаются в результате этих расследований.

Остановимся прежде всего на примерах электротравм, причиненных малым напряжением, поскольку при их расследовании встретились весьма характерные особенности и получены представляющие интерес выводы.

5.2. Поражения при напряжении сети 12—36 В

Пример 5.1. Органы судебно-медицинской экспертизы сообщили, что в одну из районных больниц доставлен труп гражданина Р., 19 лет, с сопроводительным заключением: «Попал под ток». Полученное сообщение послужило началом расследования. Оно началось с осмотра трупа. При осмотре удалось обнаружить небольшую электрометку у большого пальца на тыльной части левой руки. Она представляла собой красноватую припухлость с черной точкой примерно на середине. Электрометка оказалась единственной. При вскрытии трупа была обнаружена резко выраженная асфиксия, как известно, характеризующаяся преобладанием синей венозной крови и свидетельствующая о смерти, вызванной остановкой дыхания. При электротравмах остановка дыхания, как правило, возникает в результате не прямого, а рефлекторного действия.

Результаты вскрытия подтвердили приведенное первоначальное заключение. Началось изучение обстоятельств поражения. Пострадавший был одет в ватник. Рабочие ботинки оказались мокрыми, и их взяли в лабораторию. Измерения показали, что сопротивление подошвы мокрого ботинка составило около 200 Ом, а сопротивление этого же ботинка в сухом состоянии выразилось числом 250 кОм. Измерения производились мегомметром 1000 В и методом вольтметра-амперметра.

Путем опроса очевидцев и лиц, имевших отношение к пострадавшему, удалось выяснить, что бригада сборщиков (электротравма произошла на судостроительном заводе) в составе бригадира и двух рабочих производила уборку талого снега с металлического настила одного из строящихся объектов. Около 16 ч, перед наступлением темноты, бригадир послал одного из сборщиков в кладовую цеха за переносной лампой, так как общее освещение стало недостаточным. Получив переносную лампу с проводом, сборщик вернулся с ней к месту работы. Второй сборщик, находясь на настиле лесов на более высокой отметке, стал подключать конец провода от этой переносной лампы непосредственно к патрону общей сети 36 В, с которого была снята «рубашка», с помощью «усиков»; лампа (ее держал в левой руке первый сборщик) на мгновение загорелась, что увидели на-

ходившиеся вблизи рабочие. В тот же момент сборщик, державший лампу, упал, даже не вскрикнув. Колодку лампы он продолжал держать в руке. Вернуть его к жизни не удалось.

Напряжение 36 В, считавшееся безопасным, весьма распространено на судостроительных предприятиях. Поражение человека со смертельным исходом непосредственно от этой сети побудило провести особенно тщательное расследование.

Основная задача расследования электротравм в сети малого напряжения заключается в том, чтобы выяснить, не оказалось ли в этой сети первичное напряжение 380 В вследствие повреждения изоляции в понижающем трансформаторе, не было ли внесено повышенное напряжение в эту сеть через общую заземляющую систему и, наконец, не появилось ли повышенное напряжение по другим причинам.

Для выяснения первого предположения был произведен осмотр трансформаторного киоска, осмотр сетей всех трех напряжений и осмотр сети сварочного агрегата, а также измерено сопротивление изоляции трансформаторов 220/36 и 220/12 В, питавших соответственно сети 36 и 12 В общего освещения.

В результате осмотров и измерений установлено: на объекте, где произошел несчастный случай, имелась сеть 36 В, питавшаяся от трансформатора 220/36 В мощностью 20—25 кВт, и сеть 12 В, питавшаяся от трансформатора 220/12 В мощностью 10—15 кВт. Оба трансформатора находились в стальном киоске на расстоянии 5—6 м от объекта. Питание обоих трансформаторов от сети 380/220 В осуществлялось кабелем СБС-3×70 для напряжения ниже 1000 В. Воздушной сети 380/220 В вблизи объекта не было. Киоск запирался на ключ, хранившийся у дежурного электромонтера, который находился обычно в цехе. Измерения сопротивления изоляции показали, что изоляция обмоток трансформатора находилась в удовлетворительном состоянии, и возможность соединения обмоток 220 В с обмоткой малого напряжения была исключена.

Осмотр трансформаторного киоска опроверг предположение о возможности случайного или преднамеренного временного соединения между выводами сети 380/220 В и сети 36 В. Зажимы трансформаторов со стороны 380 и 220 В были обращены к стене киоска, попасть к ним для снятия напряжения было невозможно.

На зажимах в корпусе трансформатора следов оплавления обнаружено не было. Отсутствие напряжения сети 380/220 В в сети 36 В в момент несчастного случая подтвердилось еще и тем, что, согласно показаниям лиц, работавших на объекте, около 70 ламп общего освещения 36 В, питавшихся от того же трансформатора, в то время находились под нормальным напряжением. Переносную лампу, которой воспользовался пострадавший сборщик, проверили после несчастного случая. Оказалось, что она исправна и, следовательно, повышенного напряжения на ней не было. В случае соприкосновения хотя бы одного из полюсов сети 380/220 В с сетью 36 В накал ламп, питавшихся от сети 36 В, должен был бы заметно возрасти в результате снижения сопротивления этой сети (сеть 380/220 В имеет заземленную нейтраль). Однако никакого увеличения накала ламп лица,

работавшие на объекте непосредственно перед несчастным случаем, также не наблюдали.

Началась проверка второго предположения, а именно переноса потенциала по заземляющей системе. Вынос потенциала по заземляющей системе возможен прежде всего в четырехпроводных сетях, в которых при коротких замыканиях или даже при сильно неравномерной нагрузке могут возникнуть на заземляющих проводах, удаленных от повторных заземлителей, достаточно большие напряжения по отношению к земле. На судостроительных предприятиях широко применяется электросварка, и такое предположение, вообще говоря, вполне обоснованно. Но, спрашивается, было ли повышено напряжение в момент несчастного случая? Оказалось, что нет. Корпус объекта был подключен к заземляющей системе, к которой подключены и кожухи понижающих трансформаторов. Суммарное сопротивление заземления подобного своеобразного повторного заземлителя, как показали результаты измерения, равно 0,15 Ом. Внутри самого объекта поверхность однопотенциальна с заземляющей системой. Следовательно, и это предположение отпало.

Для окончательного суждения о значении поражающего напряжения оставалось выяснить возможность поражения от напряжения сварочного агрегата. Сварщица работала примерно на 2—2,5 м ниже отметки, на которой стоял пострадавший. Сварочный агрегат находился в другом помещении, но провод его длиной 1,5—2 м проходил на таком же расстоянии от пострадавшего. Удовлетворительное состояние изоляции сварочного провода, невозможность соединения сварочного провода с сетью 36 В позволили исключить и возможность поражения напряжением сварочного агрегата.

Таким образом, установлено, что сварщик был убит напряжением от сети 36 В. Поражение со смертельным исходом от такого напряжения возможно при крайне неблагоприятных для пострадавшего условиях. Дальнейшее исследование подтвердило, что в данном случае сложились именно такие условия.

При осмотре металлического настила, на котором находился пострадавший, удалось найти следы оплавления меди. В одном месте они были заметны невооруженным глазом, в остальных их обнаружили с помощью лупы. Эти оплавления находились непосредственно у места, где стоял пострадавший, и там, где он упал после поражения током. Изоляция шнура переносной лампы была неудовлетворительна, а кое-где отсутствовала. При осмотре шнура в оголенных местах на разных фазах удалось обнаружить следы оплавления, а на расстоянии 8—10 см от деревянной колодки провод был разорван с большим оплавлением концов. Пострадавший работал в тот день на уборке талого снега. Обувь и носки его были мокрыми.

Так удалось установить обстоятельства, при которых возникла электрическая цепь. Рабочий тыльной частью левой руки, в которой держал переносную лампу, коснулся оголенного провода в области акупунктурной зоны, связанной с центром дыхания. Другие оголенные места того же провода касались настила, на котором стоял рабочий. Возникла электрическая цепь по схеме: тыльная часть руки, державшей лампу, — нога, стоявшая на настиле.

ходившиеся вблизи рабочие. В тот же момент сборщик, державший лампу, упал, даже не вскрикнув. Колодку лампы он продолжал держать в руке. Вернуть его к жизни не удалось.

Напряжение 36 В, считавшееся безопасным, весьма распространено на судостроительных предприятиях. Поражение человека со смертельным исходом непосредственно от этой сети побудило провести особенно тщательное расследование.

Основная задача расследования электротравм в сети малого напряжения заключается в том, чтобы выяснить, не оказалось ли в этой сети первичное напряжение 380 В вследствие повреждения изоляции в понижающем трансформаторе, не было ли внесено повышенное напряжение в эту сеть через общую заземляющую систему и, наконец, не появилось ли повышенное напряжение по другим причинам.

Для выяснения первого предположения был произведен осмотр трансформаторного киоска, осмотр сетей всех трех напряжений и осмотр сети сварочного агрегата, а также измерено сопротивление изоляции трансформаторов 220/36 и 220/12 В, питавших соответственно сети 36 и 12 В общего освещения.

В результате осмотров и измерений установлено: на объекте, где произошел несчастный случай, имелась сеть 36 В, питавшаяся от трансформатора 220/36 В мощностью 20—25 кВт, и сеть 12 В, питавшаяся от трансформатора 220/12 В мощностью 10—15 кВт. Оба трансформатора находились в стальном киоске на расстоянии 5—6 м от объекта. Питание обоих трансформаторов от сети 380/220 В осуществлялось кабелем СБС-3×70 для напряжения ниже 1000 В. Воздушной сети 380/220 В вблизи объекта не было. Киоск запирался на ключ, хранившийся у дежурного электромонтера, который находился обычно в цехе. Измерения сопротивления изоляции показали, что изоляция обмоток трансформатора находилась в удовлетворительном состоянии, и возможность соединения обмоток 220 В с обмоткой малого напряжения была исключена.

Осмотр трансформаторного киоска опроверг предположение о возможности случайного или преднамеренного временного соединения между выводами сети 380/220 В и сети 36 В. Зажимы трансформаторов со стороны 380 и 220 В были обращены к стене киоска, попасть к ним для снятия напряжения было невозможно.

На зажимах в корпусе трансформатора следов оплавления обнаружено не было. Отсутствие напряжения сети 380/220 В в сети 36 В в момент несчастного случая подтвердилось еще и тем, что, согласно показаниям лиц, работавших на объекте, около 70 ламп общего освещения 36 В, питавшихся от того же трансформатора, в то время находились под нормальным напряжением. Переносную лампу, которой воспользовался пострадавший сборщик, проверили после несчастного случая. Оказалось, что она исправна и, следовательно, повышенного напряжения на ней не было. В случае соприкосновения хотя бы одного из полюсов сети 380/220 В с сетью 36 В накал ламп, питавшихся от сети 36 В, должен был бы заметно возрасти в результате снижения сопротивления этой сети (сеть 380/220 В имеет заземленную нейтраль). Однако никакого увеличения накала ламп лица,

работавшие на объекте непосредственно перед несчастным случаем, также не наблюдали.

Началась проверка второго предположения, а именно переноса потенциала по заземляющей системе. Вынос потенциала по заземляющей системе возможен прежде всего в четырехпроводных сетях, в которых при коротких замыканиях или даже при сильно неравномерной нагрузке могут возникнуть на заземляющих проводах, удаленных от повторных заземлителей, достаточно большие напряжения по отношению к земле. На судостроительных предприятиях широко применяется электросварка, и такое предположение, вообще говоря, вполне обоснованно. Но, спрашивается, было ли повышено напряжение в момент несчастного случая? Оказалось, что нет. Корпус объекта был подключен к заземляющей системе, к которой подключены и кожухи понижающих трансформаторов. Суммарное сопротивление заземления подобного своеобразного повторного заземлителя, как показали результаты измерения, равно 0,15 Ом. Внутри самого объекта поверхность однопотенциальна с заземляющей системой. Следовательно, и это предположение отпало.

Для окончательного суждения о значении поражающего напряжения оставалось выяснить возможность поражения от напряжения сварочного агрегата. Сварщица работала примерно на 2—2,5 м ниже отметки, на которой стоял пострадавший. Сварочный агрегат находился в другом помещении, но провод его длиной 1,5—2 м проходил на таком же расстоянии от пострадавшего. Удовлетворительное состояние изоляции сварочного провода, невозможность соединения сварочного провода с сетью 36 В позволили исключить и возможность поражения напряжением сварочного агрегата.

Таким образом, установлено, что сварщик был убит напряжением от сети 36 В. Поражение со смертельным исходом от такого напряжения возможно при крайне неблагоприятных для пострадавшего условиях. Дальнейшее исследование подтвердило, что в данном случае сложились именно такие условия.

При осмотре металлического настила, на котором находился пострадавший, удалось найти следы оплавления меди. В одном месте они были заметны невооруженным глазом, в остальных их обнаружили с помощью лупы. Эти оплавления находились непосредственно у места, где стоял пострадавший, и там, где он упал после поражения током. Изоляция шнура переносной лампы была неудовлетворительна, а кое-где отсутствовала. При осмотре шнура в оголенных местах на разных фазах удалось обнаружить следы оплавления, а на расстоянии 8—10 см от деревянной колодки провод был разорван с большим оплавлением концов. Пострадавший работал в тот день на уборке талого снега. Обувь и носки его были мокрыми.

Так удалось установить обстоятельства, при которых возникла электрическая цепь. Рабочий тыльной частью левой руки, в которой держал переносную лампу, коснулся оголенного провода в области акупунктурной зоны, связанной с центром дыхания. Другие оголенные места того же провода касались настила, на котором стоял рабочий. Возникла электрическая цепь по схеме: тыльная часть руки, державшей лампу, — нога, стоявшая на настиле.

ходившиеся вблизи рабочие. В тот же момент сборщик, державший лампу, упал, даже не вскрикнув. Колодку лампы он продолжал держать в руке. Вернуть его к жизни не удалось.

Напряжение 36 В, считавшееся безопасным, весьма распространено на судостроительных предприятиях. Поражение человека со смертельным исходом непосредственно от этой сети побудило провести особенно тщательное исследование.

Основная задача расследования электротравм в сети малого напряжения заключается в том, чтобы выяснить, не оказалось ли в этой сети первичное напряжение 380 В вследствие повреждения изоляции в понижающем трансформаторе, не было ли внесено повышенное напряжение в эту сеть через общую заземляющую систему и, наконец, не появилось ли повышенное напряжение по другим причинам.

Для выяснения первого предположения был произведен осмотр трансформаторного киоска, осмотр сетей всех трех напряжений и осмотр сети сварочного агрегата, а также измерено сопротивление изоляции трансформаторов 220/36 и 220/12 В, питавших соответственно сети 36 и 12 В общего освещения.

В результате осмотров и измерений установлено: на объекте, где произошел несчастный случай, имелась сеть 36 В, питавшаяся от трансформатора 220/36 В мощностью 20—25 кВт, и сеть 12 В, питавшаяся от трансформатора 220/12 В мощностью 10—15 кВт. Оба трансформатора находились в стальном киоске на расстоянии 5—6 м от объекта. Питание обоих трансформаторов от сети 380/220 В осуществлялось кабелем СБС-3×70 для напряжения ниже 1000 В. Воздушной сети 380/220 В вблизи объекта не было. Киоск запирался на ключ, хранившийся у дежурного электромонтера, который находился обычно в цехе. Измерения сопротивления изоляции показали, что изоляция обмоток трансформатора находилась в удовлетворительном состоянии, и возможность соединения обмоток 220 В с обмоткой малого напряжения была исключена.

Осмотр трансформаторного киоска опроверг предположение о возможности случайного или преднамеренного временного соединения между выводами сети 380/220 В и сети 36 В. Зажимы трансформаторов со стороны 380 и 220 В были обращены к стене киоска, попасть к ним для снятия напряжения было невозможно.

На зажимах в корпусе трансформатора следов оплавления обнаружено не было. Отсутствие напряжения сети 380/220 В в сети 36 В в момент несчастного случая подтвердилось еще и тем, что, согласно показаниям лиц, работавших на объекте, около 70 ламп общего освещения 36 В, питавшихся от того же трансформатора, в то время находились под нормальным напряжением. Переносную лампу, которой воспользовался пострадавший сборщик, проверили после несчастного случая. Оказалось, что она исправна и, следовательно, повышенного напряжения на ней не было. В случае соприкосновения хотя бы одного из полюсов сети 380/220 В с сетью 36 В накал ламп, питавшихся от сети 36 В, должен был бы заметно возрасти в результате снижения сопротивления этой сети (сеть 380/220 В имеет заземленную нейтраль). Однако никакого увеличения накала ламп лица,

работавшие на объекте непосредственно перед несчастным случаем, также не наблюдали.

Началась проверка второго предположения, а именно переноса потенциала по заземляющей системе. Вынос потенциала по заземляющей системе возможен прежде всего в четырехпроводных сетях, в которых при коротких замыканиях или даже при сильно неравномерной нагрузке могут возникнуть на заземляющих проводах, удаленных от повторных заземлителей, достаточно большие напряжения по отношению к земле. На судостроительных предприятиях широко применяется электросварка, и такое предположение, вообще говоря, вполне обоснованно. Но, спрашивается, было ли повышено напряжение в момент несчастного случая? Оказалось, что нет. Корпус объекта был подключен к заземляющей системе, к которой подключены и кожухи понижающих трансформаторов. Суммарное сопротивление заземления подобного своеобразного повторного заземлителя, как показали результаты измерения, равно 0,15 Ом. Внутри самого объекта поверхность однопотенциальна с заземляющей системой. Следовательно, и это предположение отпало.

Для окончательного суждения о значении поражающего напряжения оставалось выяснить возможность поражения от напряжения сварочного агрегата. Сварщица работала примерно на 2—2,5 м ниже отметки, на которой стоял пострадавший. Сварочный агрегат находился в другом помещении, но провод его длиной 1,5—2 м проходил на таком же расстоянии от пострадавшего. Удовлетворительное состояние изоляции сварочного провода, невозможность соединения сварочного провода с сетью 36 В позволили исключить и возможность поражения напряжением сварочного агрегата.

Таким образом, установлено, что сварщик был убит напряжением от сети 36 В. Поражение со смертельным исходом от такого напряжения возможно при крайне неблагоприятных для пострадавшего условиях. Дальнейшее исследование подтвердило, что в данном случае сложились именно такие условия.

При осмотре металлического настила, на котором находился пострадавший, удалось найти следы оплавления меди. В одном месте они были заметны невооруженным глазом, в остальных их обнаружили с помощью лупы. Эти оплавления находились непосредственно у места, где стоял пострадавший, и там, где он упал после поражения током. Изоляция шнура переносной лампы была неудовлетворительна, а кое-где отсутствовала. При осмотре шнура в оголенных местах на разных фазах удалось обнаружить следы оплавления, а на расстоянии 8—10 см от деревянной колодки провод был разорван с большим оплавлением концов. Пострадавший работал в тот день на уборке талого снега. Обувь и носки его были мокрыми.

Так удалось установить обстоятельства, при которых возникла электрическая цепь. Рабочий тыльной частью левой руки, в которой держал переносную лампу, коснулся оголенного провода в области акупунктурной зоны, связанной с центром дыхания. Другие оголенные места того же провода касались настила, на котором стоял рабочий. Возникла электрическая цепь по схеме: тыльная часть руки, державшей лампу,—нога, стоявшая на настиле.

Получив удар электрическим током и упав, пострадавший, по-видимому, соединил оголенную часть провода с металлическим настилом. Возникло короткое замыкание, в результате которого провод перегорел, а пострадавший «дополнительно включился» в электрическую цепь последовательно с лампой и находился в таком состоянии до того момента, пока эта цепь не была разорвана бригадиром, что произошло через 2—3 мин после удара.

Рассмотренная электротравма относится к числу сложных. Она началась с однополюсного прикосновения и окончилась, по-видимому, двухполюсным. Погиб ли Р. от однополюсного прикосновения или от двухполюсного, получив от первого только удар, сказать трудно.

Каковы же токи, вызвавшие столь тяжелый исход? Оценить их можно было, конечно, лишь с точностью, не выходящей за определенные пределы. Для начала надо было составить суждение о сопротивлении всей электрической цепи, в том числе и тела пострадавшего. Пределы последнего из этих сопротивлений оценили в прозекторской, для чего измерили сопротивление между металлическим электродом, имевшим форму ступни и плотно к ней прибинтованным, и металлическим же электродом площадью 40 см^2 , плотно прибинтованным к тыльной части левой руки у электрометки. Измерения производили на переменном токе методом вольтметра-амперметра при различных значениях напряжения. В пределах от 16 до 220 В, как и ожидалось, зависимость сопротивления от напряжения обладала значительной нелинейностью. Особенно резко эта нелинейность была выражена в пределах от 30 В, когда сопротивление составляло 12,6 кОм, до 110 В, когда оно упало до 3,2 кОм. При 36 В сопротивление составило 10,8 кОм. Используя поправочный коэффициент, предложенный Е. В. Френкель и равный для данной цепи 1,65, нетрудно высчитать, что электрическое сопротивление цепи, которое могло быть при жизни пострадавшего, составляло 6,6 кОм.

Далее измерили сопротивление обуви, вернее, подошв ботинок пострадавшего. Измерения производили в сухом, влажном и мокром состоянии с помощью электродов в форме подошвы. Один из электродов помещали внутрь ботинка и придавливали грузом 25 кг, второй прикладывали к нижней стороне подошвы.

Значения сопротивления оказались следующими: в сухом состоянии при напряжении 10 и 110 В — свыше 50 кОм, во влажном — от 3 до 5 кОм, в мокром — от 1 до 1,5 кОм.

Итак, минимальное сопротивление электрической цепи, полученное как сумма двух сопротивлений, выразилось числом 8 кОм. Для проверки было произведено измерение с надетыми на ноги трупа мокрыми ботинками, внутри которых находились металлические электроды. Результаты: при напряжении 50 В суммарное сопротивление — около 13 кОм, а с учетом поправочного коэффициента — около 10 кОм.

Следовательно, пределы поражающего тока составляют 3—10 мА. Но надо учесть, что при оценке брались наихудшие условия (мокрая обувь, металлический контакт).

Пример 5.2. Пострадал К. — электромонтер, 21 года. Труп был доставлен в прозекторскую с заключением: «Электротравма?». На

теле электрометок и ожогов не оказалось. Вскрытие выявило четко выраженную асфиксию. По свидетельству врача, пытавшегося спасти пострадавшего, в первое время после травмы прощупывался нитевидный пульс. К искусственному дыханию приступили через 2—3 мин после того, как пострадавший упал.

Выяснились следующие обстоятельства поражения. Происходила приемка стационарной проводки в подвальном помещении особого назначения. Чтобы осветить помещение и тем самым сделать возможным осмотр его комиссией, от стоявшего наверху понижающего трансформатора 220/12 В был опущен в подвал провод марки ПР с переносной лампой. Этот провод на всем его протяжении, за исключением небольшого участка непосредственно у каркаса лампы, был заключен в резиновый шланг. Но длина провода оказалась недостаточной, и члены комиссии производили осмотр с помощью аккумуляторных фонарей, а провод, свернутый бухтой, вместе с лампой был повешен внизу на перилах железной лестницы. После окончания приемки К. взялся правой рукой за бухту провода, собираясь отнести ее вместе с переносной лампой наверх, а левой рукой коснулся металлической лестницы. В тот же момент он вскрикнул и стал приседать. Когда лица, подоспевшие на помощь, пытались поднять пострадавшего, то ощутили удар током. После того как К. был освобожден от прикосновения к проводу переносной лампы, его вынесли наверх, но спасти, несмотря на принятые меры, не смогли.

Переносную лампу и понижающий трансформатор доставили в лабораторию. Тщательная проверка сопротивления изоляции трансформатора показала отсутствие связи между сетями напряжением 127 и 12 В. При осмотре гибкого многожильного провода переносной лампы обнаружилось, что одна из его жил была оголена на протяжении 5—6 мм. Изоляционная лента была наложена крайне небрежно, концы ее не прилегали к проводу. Плохо изолированное соединение переносной лампы со шланговым проводом и создало электрическую цепь через тело человека. Второй полюс сети 12 В был заземлен. Таким образом, К. испытал, по существу, двухполюсное прикосновение с токоведущими частями сети 12 В, что и послужило причиной его гибели.

Выноса потенциала по заземляющей системе не могло быть. Помещение, где произошло поражение, предназначено для административных целей, и днем там однофазной нагрузки, от сети которой питался понижающий трансформатор, практически не имелось. Все же с целью проверки к щитку понижающего трансформатора подключили 5-киловаттный однофазный электроприемник. Даже при такой невероятно неравномерной нагрузке напряжение на заземляющей системе сети 12 В по отношению к земле повысилось всего на 0,8 В. В качестве «земли» использовалась водопроводная система, имевшаяся в подвале. Каких-либо других источников появления напряжения не было, и факт смертельного поражения при 12 В оказался установленным.

Необычность этого случая побудила произвести все необходимые измерения, включая и определение электрического сопротивления трупa пострадавшего. В принципе методика измерений была такой же,

Получив удар электрическим током и упав, пострадавший, по-видимому, соединил оголенную часть провода с металлическим настилом. Возникло короткое замыкание, в результате которого провод перегорел, а пострадавший «дополнительно включился» в электрическую цепь последовательно с лампой и находился в таком состоянии до того момента, пока эта цепь не была разорвана бригадиром, что произошло через 2—3 мин после удара.

Рассмотренная электротравма относится к числу сложных. Она началась с однополюсного прикосновения и окончилась, по-видимому, двухполюсным. Погиб ли Р. от однополюсного прикосновения или от двухполюсного, получив от первого только удар, сказать трудно.

Каковы же токи, вызвавшие столь тяжелый исход? Оценить их можно было, конечно, лишь с точностью, не выходящей за определенные пределы. Для начала надо было составить суждение о сопротивлении всей электрической цепи, в том числе и тела пострадавшего. Пределы последнего из этих сопротивлений оценили в прозекторской, для чего измерили сопротивление между металлическим электродом, имевшим форму ступни и плотно к ней прибинтованным, и металлическим же электродом площадью 40 см^2 , плотно прибинтованным к тыльной части левой руки у электрометки. Измерения производили на переменном токе методом вольтметра-амперметра при различных значениях напряжения. В пределах от 16 до 220 В, как и ожидалось, зависимость сопротивления от напряжения обладала значительной нелинейностью. Особенно резко эта нелинейность была выражена в пределах от 30 В, когда сопротивление составляло 12,6 кОм, до 110 В, когда оно упало до 3,2 кОм. При 36 В сопротивление составило 10,8 кОм. Используя поправочный коэффициент, предложенный Е. В. Френкель и равный для данной цепи 1,65, нетрудно высчитать, что электрическое сопротивление цепи, которое могло быть при жизни пострадавшего, составляло 6,6 кОм.

Далее измерили сопротивление обуви, вернее, подошв ботинок пострадавшего. Измерения производили в сухом, влажном и мокром состоянии с помощью электродов в форме подошвы. Один из электродов помещали внутрь ботинка и придавливали грузом 25 кг, второй прикладывали к нижней стороне подошвы.

Значения сопротивления оказались следующими: в сухом состоянии при напряжении 10 и 110 В — свыше 50 кОм, во влажном — от 3 до 5 кОм, в мокром — от 1 до 1,5 кОм.

Итак, минимальное сопротивление электрической цепи, полученное как сумма двух сопротивлений, выразилось числом 8 кОм. Для проверки было произведено измерение с надетыми на ноги трупа мокрыми ботинками, внутри которых находились металлические электроды. Результаты: при напряжении 50 В суммарное сопротивление — около 13 кОм, а с учетом поправочного коэффициента — около 10 кОм.

Следовательно, пределы поражающего тока составляют 3—10 мА. Но надо учесть, что при оценке брались наихудшие условия (мокрая обувь, металлический контакт).

Пример 5.2. Пострадал К. — электромонтер, 21 года. Труп был доставлен в прозекторскую с заключением: «Электротравма?». На

теле электрометок и ожогов не оказалось. Вскрытие выявило четко выраженную асфиксию. По свидетельству врача, пытавшегося спасти пострадавшего, в первое время после травмы прощупывался нитевидный пульс. К искусственному дыханию приступили через 2—3 мин после того, как пострадавший упал.

Выяснились следующие обстоятельства поражения. Происходила приемка стационарной проводки в подвальном помещении особого назначения. Чтобы осветить помещение и тем самым сделать возможным осмотр его комиссией, от стоявшего наверху понижающего трансформатора 220/12 В был опущен в подвал провод марки ПР с переносной лампой. Этот провод на всем его протяжении, за исключением небольшого участка непосредственно у каркаса лампы, был заключен в резиновый шланг. Но длина провода оказалась недостаточной, и члены комиссии производили осмотр с помощью аккумуляторных фонарей, а провод, свернутый бухтой, вместе с лампой был повешен внизу на перилах железной лестницы. После окончания приемки К. взялся правой рукой за бухту провода, собираясь отнестись вместе с переносной лампой наверх, а левой рукой коснулся металлической лестницы. В тот же момент он вскрикнул и стал приседать. Когда лица, подоспевшие на помощь, пытались поднять пострадавшего, то ощутили удар током. После того как К. был освобожден от прикосновения к проводу переносной лампы, его вынесли наверх, но спасти, несмотря на принятые меры, не смогли.

Переносную лампу и понижающий трансформатор доставили в лабораторию. Тщательная проверка сопротивления изоляции трансформатора показала отсутствие связи между сетями напряжением 127 и 12 В. При осмотре гибкого многожильного провода переносной лампы обнаружилось, что одна из его жил была оголена на протяжении 5—6 мм. Изоляционная лента была наложена крайне небрежно, концы ее не прилегали к проводу. Плохо изолированное соединение переносной лампы со шланговым проводом и создало электрическую цепь через тело человека. Второй полюс сети 12 В был заземлен. Таким образом, К. испытал, по существу, двухполюсное прикосновение с токоведущими частями сети 12 В, что и послужило причиной его гибели.

Выноса потенциала по заземляющей системе не могло быть. Помещение, где произошло поражение, предназначено для административных целей, и днем там однофазной нагрузки, от сети которой питался понижающий трансформатор, практически не имелось. Все же с целью проверки к щитку понижающего трансформатора подключили 5-киловаттный однофазный электроприемник. Даже при такой невероятно неравномерной нагрузке напряжение на заземляющей системе сети 12 В по отношению к земле повысилось всего на 0,8 В. В качестве «земли» использовалась водопроводная система, имевшаяся в подвале. Каких-либо других источников появления напряжения не было, и факт смертельного поражения при 12 В оказался установленным.

Необычность этого случая побудила произвести все необходимые измерения, включая и определение электрического сопротивления трупa пострадавшего. В принципе методика измерений была такой же,

как и в предыдущем описании. Разница заключалась лишь в том, что надо было измерить электрическое сопротивление как между двумя ладонями, так и между ладонью левой руки и тыльной частью правой руки, т. е. между участками тела, ставшими, как предполагалось, участками электрической цепи. При напряжении 12 В электрическое сопротивление между двумя электродами, наложенными на ладони, оказалось равным 18,8 кОм, между ладонью и тыльной частью руки — 74,5 кОм, а с учетом поправочных коэффициентов — соответственно 11,2 и 27 кОм. Полученные значения токов (1,2—4,5 мА) и в этом случае лежат за пределами значений ощутимых токов.

К сожалению, в обоих описанных случаях не была с требуемой точностью установлена продолжительность существования электрической цепи. Показания очевидцев заставляют полагать, что это время длилось от секунды до минуты.

Опишем также поражения малым напряжением, закончившиеся смертельными исходами, наступившими спустя некоторое время после разрыва электрической цепи. В обоих случаях электрометок на теле пострадавших не было обнаружено.

Пример 5.3. Первый из этих случаев произошел в шахте грузоподъемного лифта во время монтажа блокировки. Под напряжением находилась только переносная лампа, освещавшая рабочее место. Когда работавший выходил из шахты, он коснулся лбом металлической конструкции шахты, а запястьем, как это показано на рис. 5.1, задел за недостаточно хорошо изолированное соединение провода, питавшего лампу. Получив удар током, он отошел на несколько шагов



Рис. 5.1. Положение пострадавшего в момент, предшествовавший смертельному поражению (имитация)



Рис. 5.2. Пострадавший в момент смерти (имитация)

и сел, как показано на рис. 5.2, после чего начал звать на помощь, прося отключить сеть, хотя электрическая цепь была разорвана. Подбежавшие на помощь доказывали пострадавшему, что напряжения нет. Однако он с этим не соглашался, продолжая требовать отключения. Примерно через 15 мин после травмы пострадавший, не меняя своего положения, умер. На его теле обнаружены электрометки на запястье и на лбу. При исследовании установлено, что напряжение, вызвавшее травму, не превышало 10—15 В.

Пример 5.4. Вторая электротравма, вызванная малым напряжением и закончившаяся смертью после разрыва электрической цепи, произошла примерно в тех же условиях в кабине крана. Пострадавший, получив удар током, вышел из кабины, спустился вниз и в нескольких шагах от крана умер.

5.3. Поражения постоянным током

Изучению сравнительной опасности постоянного и переменного тока посвящено немало работ. Эксперименты на животных склоняют многих авторов к мнению о большей опасности (при одном и том же напряжении) переменного тока. Не подвергая этот вывод сомнению, отметим, однако, что изучение электротравм человека, особенно производственных, дает иную картину. Установлено, что как раз включение людей в цепь постоянного тока создает в ряде случаев более обширные очаги поражения и приводит к более тяжелым исходам, нежели включение их в цепь переменного тока. Поскольку теперь с развитием электрохимической, электроме-

как и в предыдущем описании. Разница заключалась лишь в том, что надо было измерить электрическое сопротивление как между двумя ладонями, так и между ладонью левой руки и тыльной частью правой руки, т. е. между участками тела, ставшими, как предполагалось, участками электрической цепи. При напряжении 12 В электрическое сопротивление между двумя электродами, наложенными на ладони, оказалось равным 18,8 кОм, между ладонью и тыльной частью руки — 74,5 кОм, а с учетом поправочных коэффициентов — соответственно 11,2 и 27 кОм. Полученные значения токов (1,2—4,5 мА) и в этом случае лежат за пределами значений ощутимых токов.

К сожалению, в обоих описанных случаях не была с требуемой точностью установлена продолжительность существования электрической цепи. Показания очевидцев заставляют полагать, что это время длилось от секунды до минуты.

Опишем также поражения малым напряжением, закончившиеся смертельными исходами, наступившими спустя некоторое время после разрыва электрической цепи. В обоих случаях электрометров на теле пострадавших не было обнаружено.

Пример 5.3. Первый из этих случаев произошел в шахте грузо-подъемного лифта во время монтажа блокировки. Под напряжением находилась только переносная лампа, освещавшая рабочее место. Когда работавший выходил из шахты, он коснулся лбом металлической конструкции шахты, а запястьем, как это показано на рис. 5.1, задел за недостаточно хорошо изолированное соединение провода, питавшего лампу. Получив удар током, он отошел на несколько шагов



Рис. 5.1. Положение пострадавшего в момент, предшествовавший смертельному поражению (имитация)



Рис. 5.2. Пострадавший в момент смерти (имитация)

и сел, как показано на рис. 5.2, после чего начал звать на помощь, прося отключить сеть, хотя электрическая цепь была разорвана. Подбежавшие на помощь доказывали пострадавшему, что напряжения нет. Однако он с этим не соглашался, продолжая требовать отключения. Примерно через 15 мин после травмы пострадавший, не меняя своего положения, умер. На его теле обнаружены электрометки на запястье и на лбу. При исследовании установлено, что напряжение, вызвавшее травму, не превышало 10—15 В.

Пример 5.4. Вторая электротравма, вызванная малым напряжением и закончившаяся смертью после разрыва электрической цепи, произошла примерно в тех же условиях в кабине крана. Пострадавший, получив удар током, вышел из кабины, спустился вниз и в нескольких шагах от крана умер.

5.3. Поражения постоянным током

Изучению сравнительной опасности постоянного и переменного тока посвящено немало работ. Эксперименты на животных склоняют многих авторов к мнению о большей опасности (при одном и том же напряжении) переменного тока. Не подвергая этот вывод сомнению, отметим, однако, что изучение электротравм человека, особенно производственных, дает иную картину. Установлено, что как раз включение людей в цепь постоянного тока создает в ряде случаев более обширные очаги поражения и приводит к более тяжелым исходам, нежели включение их в цепь переменного тока. Поскольку теперь с развитием электрохимической, электроме-

таллургической и других аналогичных отраслей промышленности постоянный ток находит все более широкое применение, на это обстоятельство нельзя не обратить внимание. Рассмотрим характерные примеры.

Пример 5.5. В 20 ч 10 декабря 1981 г. работница Ш., 58 лет, приступила к работе на участке обжига ферритов. Работа проводилась на электропечи туннельно-вагонеточного типа. Под утро следующего дня, около 3 ч, она по собственной инициативе начала очищать нижнюю часть электропечи от отходов продукции. При этом Ш., стоя на коленях, прикоснулась плечом к токоведущим частям, находившимся под напряжением 157 В постоянного тока. Через ее тело возникла электрическая цепь, и Ш. была отброшена на пол (рис. 5.3 и 5.4), получив смертельный удар током.

Расследование показало, что работы по монтажу электропечи были выполнены с отступлением от проекта предприятия-изготовителя, а именно не были установлены металлические жалюзи для ограждения нижней части электропечи. Вследствие этого токоведущие части, находившиеся под напряжением, оказались доступными для прикосновения.

Электрическая цепь через тело пострадавшей возникла по схеме: правая ладонь, непосредственно контактировавшая с шиной, — плечо, касавшееся металлической конструкции, — колени, упавшиеся в пол. Каких-либо следов оплавления на шине и на конструкции не обнаружено, контакт плеча и коленей произошел через одежду. Таким образом, ожоги были вызваны непосредственно током, а не пламенем дуги. Они видны на рис. 5.5. Гистологические наблюдения выявили специфику повреждения кожи, не наблюдаемую при термическом ожоге. Примерно такие же следы наблюдались в другом случае — при смертельной электротравме на электролизере, но тогда они были условно объяснены спецификой поражения более высоким напряжением постоянного тока.

Непосредственными причинами рассмотренной в примере 5.5 электротравмы являлись: а) отсутствие ограждений токоведущих частей электропечи; б) отсутствие контроля со стороны администрации цеха за выполнением работ на участке обжига в ночную смену. Несчастному случаю также способствовали: в) отсутствие в инструкции по технике безопасности указаний о безопасных мерах при выполнении работ по уборке битых изделий из-под печи; г) слабый контроль со стороны администрации цеха и электрохозяйства за состоянием электротехнического оборудования, о чем свидетельствует тот факт, что и на двух других электропечах этого же типа, имевшихся в цехе, также отсутствовали металлические жалюзи; д) низкая требовательность комиссии по приемке в эксплуатацию электропечи, разрешившей эксплуатацию агрегата, несмотря на грубые нарушения правил техники



Рис. 5.3. Помещение распределительного устройства, где произошла электротравма

безопасности. Но общей, и притом главной, причиной нарушений, приведших к гибели работницы, была недооценка опасности постоянного тока напряжением менее 200 В.

Приведенный пример показывает, что многие сложнейшие механизмы действия электрического тока на человека далеко еще не раскрыты, а природа биофизики электросопротивления живой ткани расшифрована не до конца. Все это за-



Рис. 5.4. Тело пострадавшей на месте происшествия после соприкосновения с шинами постоянного тока напряжением 157 В
Вид со стороны входа в распределительное устройство



Рис. 5.5. Повреждение кожи на теле пострадавшей в месте соприкосновения ее с заземлением металлической конструкции

ставляет нас архиосторожно подходить к распространению на человека данных, получаемых в опытах на животных. Наконец, этот пример лишний раз напоминает о необходимости неуклонно выполнять существующие правила электробезопасности, исключающие доступ к токоведущим частям, находящимся даже под малым напряжением.

5.4. Поражения при напряжении сети 220 В

Пример 5.6. Характерен несчастный случай в сети напряжением 220 В, закончившийся смертью слесаря Н., 26 лет. При осмотре трупа были обнаружены слабые электрометки на обеих ладонях. Диагноз судебно-медицинской экспертизы гласил: «Смерть наступила вследствие асфиксии, вызванной электрическим током».

Обстоятельства дела таковы. На металлообрабатывающем заводе производилась наладка подъемного крана. Помогая мастеру, исправлявшему подъемный механизм крана, слесарь держал обеими руками металлический трос. Он коснулся ногой обнаженного токоведущего провода, шедшего к шпindelьному концевому выключателю, и погиб.

Поражения людей шаговым напряжением в сетях напряжением выше 1000 В известны давно. В литературе по электробезопасности приводятся достаточно обстоятельные описания подобных поражений. Они обычны для сельских местностей в случае обрыва проводов линий электропередачи высокого напряжения и падения их на землю. Но уже в 30-х годах появляются описания подобных поражений и в сетях напряжением ниже 1000 В [40]. Интересен также случай, который произошел в послевоенный период на одном из заводов крупного промышленного центра в СССР.

Пример 5.7. Бригада «Скорой помощи» была вызвана на завод по поводу одновременного поражения трех человек электрическим током. У двоих из пострадавших электротравма не имела серьезных последствий (во всяком случае, на протяжении годичного наблюдения за ними после происшествия). Третий из пострадавших скончался в момент поражения. Погибшему было 42 года. Он был одет в пальто и обут в обычные ботинки на кожаной подошве. Диагноз судебно-медицинского эксперта был лаконичен: «Смерть вследствие поражения дыхательных центров нервной системы, вызвавшего глубокую асфиксию».

Происшествие заслуживает подробного описания. На территории предприятия находился на поверхности кабель марки СБС-3×25. Кабель использовали для временных нужд, после чего так и оставили подключенным к сети напряжением 380/220 В. Через территорию, на которой лежал кабель, нужно было перевозить тяжести на металлической тележке. Для более удобного перевала тележки через кабель на

него наложили железный лист толщиной 2—3 мм. Неполно нагруженную тележку через кабель перевезли благополучно, но в момент обратного въезда тяжело нагруженной тележки на железный лист кабель был поврежден, произошло соединение одной из его жил с железным листом. В результате у места, где лист был наложен на кабель, возникло шаговое напряжение. Рабочие, толкавшие тележку, получили электрический удар, от которого один из них упал, а второй с криком отскочил от тележки. Оба они отделались испугом. Рабочий же, шедший рядом и не касавшийся тележки, получил электрический удар от шагового напряжения. Вначале он стал медленно приседать, а затем, скорчившись, упал. Искусственное дыхание, которое сделали ему подбежавшие товарищи, не дало результатов, и он погиб.

Если бы не было очевидцев и повреждение кабеля груженой тележкой не сопровождалось коротким замыканием с соответствующим действием предохранителей, то установить, что смерть последовала от электрического удара, было бы крайне трудно. На рис. 5.6 показаны общий вид места происшествия и тележка, которая вызвала аварию.

Задача расследования заключалась в установлении значения поражающего напряжения. В данных условиях это оказалось далеко не простым делом. Пришлось имитировать происшествие. Опыт производился на рабочем напряжении 220 В, т. е. на том напряжении, которое имелось на кабеле в момент несчастного случая. Тщательно было измерено напряжение на поверхности почвы вблизи металлического листа, а затем по данным измерений были построены эквипотенциальные кривые, позволившие установить, что максимально возможное напряжение, которое вызвало электротравму, составляло для рабочих, толкавших тележку, 70—80 В, а для погибшего, находивше-



Рис. 5.6. Общий вид места происшествия

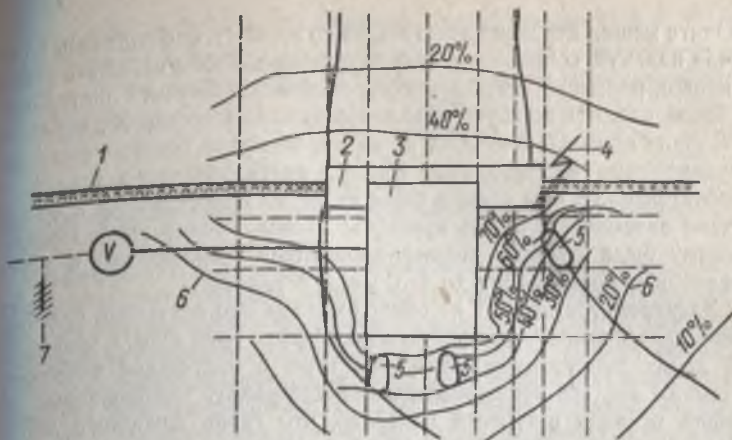


Рис. 5.7. Эквипотенциальные кривые, полученные опытным путем для определения поражающего напряжения

1 — кабель; 2 — металлический лист, наложенный на кабель; 3 — тележка; 4 — место короткого замыкания; 5 — места расположения пострадавших; 6 — эквипотенциальные кривые; 7 — переносные зонды для определения эквипотенциальных областей

гося рядом с тележкой, — всего 10—15 В (шаговое напряжение). Но последний при падении мог получить, если учесть расположение тела, удар напряжением 25—30 В. Если принять во внимание электрическое сопротивление обуви (при положении стоя) и одежды (при положении лежа), то можно полагать, что поражающее напряжение было меньше указанного, хотя и ненамного. Время существования электрической цепи удалось определить точно, осциллографируя быстрое действие предохранителя: оно оказалось равным 1,8 с.

При поражении шаговым напряжением общая поверхность соприкосновения тела (ступни) с поражающим источником составляет не менее 400 см². Емкостное сопротивление велико, и здесь, по-видимому, решающее значение в исходе поражения имел ток в переходном процессе. На рис. 5.7 показаны эквипотенциальные кривые, полученные при определении поражающего напряжения; там же указаны места расположения рабочих.

Почему же погиб рабочий, оказавшийся под меньшим напряжением, и не погибли рабочие, оказавшиеся под большим напряжением? Можно предположить, что для оставшихся в живых рабочих положительную роль сыграла нервная система: физические усилия, с которыми была связана работа по передвижению тележки, создали то, что С. Еллинек назвал «спасительным фактором внимания» (см. § 6.2).

Пример 5.8. Для футеровки отделочной фанеры в столярной мастерской научно-исследовательского института использовался утюг, подобный портновскому. Подключался он к обычному осветительному штепселю сети 220 В. Провод, шедший от утюга к штепселю, был заключен в резиновый шланг, что, по мнению электрика института, обеспечивало дополнительную изоляцию. Но провод

в шланге мешал передвижению людей по проходу, наблюдались даже случаи падения, сопровождавшиеся ушибами. Чтобы избежать этого, на провод наложили двухмиллиметровый металлический лист. Годами такой переход всех устраивал. Но однажды столяр Х., перенося груз, споткнулся об этот лист и, падая, коснулся токарного станка, находившегося за проходом. Корпус двигателя этого станка, а следовательно, и сам станок были надежно присоединены к общей системе заземления. Успев крикнуть: «Ток!», столяр упал. Пострадавшему была оказана квалифицированная доврачебная, а затем и врачебная помощь, спасти его, увы, не удалось.

Электротока на теле не обнаружилось. Это поставило судебно-медицинского эксперта в затруднение. Однако крик «Ток!», услышанный двумя присутствовавшими при этом в мастерской рабочими, заставлял все же предположить электротравму. Обследование состояния провода в шланге показало, что грань железного листа, повредив шланг, повредила и изоляцию провода, в результате чего лист при переходе по нему оказывался под напряжением. Моделирование происшествия, осуществленное по описаниям очевидцев, при сети, отключенной от источника питания, показало, что, наиболее вероятно, электрическая цепь через тело пострадавшего возникла между тыльной поверхностью кисти левой руки и ногами. В тот день шел сильный дождь, и обувь пострадавшего, только что вошедшего в помещение мастерской со двора, была мокрой.

Пример 5.9. Физическая лаборатория вуза подверглась модернизации. К вновь установленному оборудованию подвели напряжение от сети 380/220 В. Для этой цели использовали кабель со свинцовой и стальной оболочками. Правда, этот кабель уже эксплуатировался длительное время в другом месте, но данное обстоятельство не внушало опасений, так как помещение лаборатории относилось к категории «без повышенной опасности». Однако даже в таком помещении подключение кабеля к оборудованию следовало выполнить, конечно, по правилам. Между тем муфты при разделке кабеля для подключения к зажимам и у питающего щитка не были заземлены. До поры до времени это сходило с рук.

Но вот понадобилось установить в центр лабораторного помещения специальный трансформатор. Трассу, по которой затаскивали это устройство массой 200 кг, пересекал упомянутый нами кабель. Чтобы не поднимать трансформатор при его протаскивании через кабель, на последний положили доски. Студентов, исполнявших обязанности грузчиков, не предупредили об опасности операции, и они не избегали соприкосновения с кабелем. В момент, когда трансформатор находился над кабелем, двое из четверых студентов почувствовали удар током. Оказалось, что под тяжестью трансформатора старая, изношенная изоляция кабеля повредилась и произошел ее пробой. Образовалась электрическая цепь: пробитый кабель — стоявшая на нем нога грузчика — его рука, касавшаяся хорошо заземленного оборудования, стоявшего вплотную к проходу. Один из получивших удар током отделался испугом, другой погиб. Расследование показало, что через 2 с после пробоя изоляции кабеля сработала защита, но спасти человека она не успела.

Случай аналогичен описанному в примере 5.8. Вывод однозначен: в проходах недопустима даже временная прокладка проводов и кабелей, находящихся под напряжением. Прокладка должна осуществляться либо под полом, либо по стенам.

Приведем еще два примера электротравм, на этот раз производственных, вызванных шаговым напряжением.

Пример 5.10. В процедурном отделении одной из поликлиник был обнаружен труп больного, незадолго до этого вошедшего в помещение для приема ванны. Погибший — мужчина 55 лет — был найден голым, склонившимся над ванной на согнутых в коленях ногах. Каких-либо следов тока на теле не было обнаружено. Вскрытие установило, что смерть последовала от асфиксии. Электротравма, фигурировавшая в посмертном диагнозе, как будто не вытекала из обстоятельств дела, ибо в ванном помещении проводка была скрытая, выключатель находился вне помещения, а осветительный плафон в полуутопленном виде — на потолке. Но в процессе следствия по уголовному делу о внезапной смерти выяснились важные дополнительные обстоятельства. Оказалось, что накануне происшествия уборщица, готовившая эту ванну, жаловалась, что при прикосновении к ней «бьет током». Утром, до начала процедуры, монтер осмотрел ванну и ничего не обнаружил, он продемонстрировал уборщице, что напряжения нет, в чем она убедилась и сама, коснувшись ванны. В дневное время принятие процедур происходило без каких-либо жалоб. Погибший оказался первым больным, начавшим принимать ванну при электрическом освещении.

Исследование показало, что включение освещения создает на ванне и на полу, в зоне, к ней прилегающей, напряжение. Оно не было обнаружено лицами, оказавшимися возле пострадавшего и затем обследовавшими место происшествия, потому что все они подходили к ванне в обуви, обладавшей достаточной изоляцией. Снятие кривых распределения напряжения вокруг ванны и на полу показало, что напряжение увеличивалось в направлении к одной из стен. Плотность эквипотенциальных линий и поверхностей росла по мере приближения к месту прохода скрытой проводки через стену.

Демонтаж этой проводки выявил, что провод из-за низкого качества изоляции соединения касался корпуса соединительной коробки, а следовательно, и стены. Напряжение между корпусом этой коробки и ванной оказалось почти равным фазному. Напряжение между ванной и металлической пластинкой, положенной на пол, составляло 20 В. Шаговое напряжение в пределах пола колебалось от 5 до 15 В. Этим напряжением и был убит пострадавший. Сделав несколько шагов по деревянному настилу, не доходившему до ванны, он ступил на пол, и, стоя на нем, коснулся ванны.

В данном случае в цепи никаких сопротивлений, ограничивающих ток, не имелось, и последний обуславливался только электрическим сопротивлением тела пострадавшего. Многочисленные ранее проведенные измерения показывают, что эту величину можно принять

равной 500 Ом. А если это так, то ток через тело, по-видимому, составлял 15—25 мА, что, по мнению многих авторов, уже опасно.

Аналогичный случай, но не приведший к смертельному исходу, произошел в одной из бань.

Подобные случаи появления напряжения между стеной, полом и водопроводом не так уж редки. Они вызываются дефектами проводки, особенно частыми в местах прохода через стены и в розетках штепселей и выключателей в ванных и кухонных помещениях жилых и коммунальных зданий. Поэтому осуществляемый в ряде городов перевод электрических сетей жилых домов с напряжения 127 В на напряжение 220 В должен сопровождаться тщательным приведением квартирных электрических сетей в порядок и хотя бы однократным испытанием их мегомметром 500 В. К сожалению, опыт показывает, что выявление участков с повышенной электропроводимостью — дело не простое. Оно требует навыков, но пренебрегать им нельзя, ибо, как вытекает из сказанного, отклонения, подчас даже незначительные, от правил устройств электротехнических установок приводят к образованию очагов электротравм.

5.5. Приложение аналитического метода к инструментальному расследованию электротравм

Наведенное напряжение. Применение аналитического метода при инструментальном анализе электротравм было подробно описано в нашей работе [42] на примере расследования массового поражения напряжением, наведенным на линию связи. Здесь мы ограничимся кратким рассмотрением этого поучительного случая.

Пример 5.11. В одном из южных районов Советского Союза во время сильного урагана произошло соприкосновение проводов воздушной линии электропередачи напряжением 6 кВ с проводами радиотрансляционной сети. Оно сопровождалось появлением напряжения промышленной частоты в радиотрансляционной сети, что вызвало смертельные электротравмы. Задача расследования заключалась в определении характера развития аварии и в оценке возникших напряжений для последующей выработки защитных мероприятий.

На рис. 5.8 показана общая схема пересечки ЛЭП с проводами радиотрансляционной сети, а на рис. 5.9 — соответствующая электрическая схема.

Определение напряжения промышленной частоты относительно земли, возникшего в радиосети, зависит от многих факторов, учесть которые практически невозможно. Поэтому для решения поставленной задачи пришлось сделать ряд допущений, а именно принять сопротивление заземления пяти радиоточек равным 20 Ом каждое, а десяти — соответственно 10 Ом. Сделанное допущение позволяет

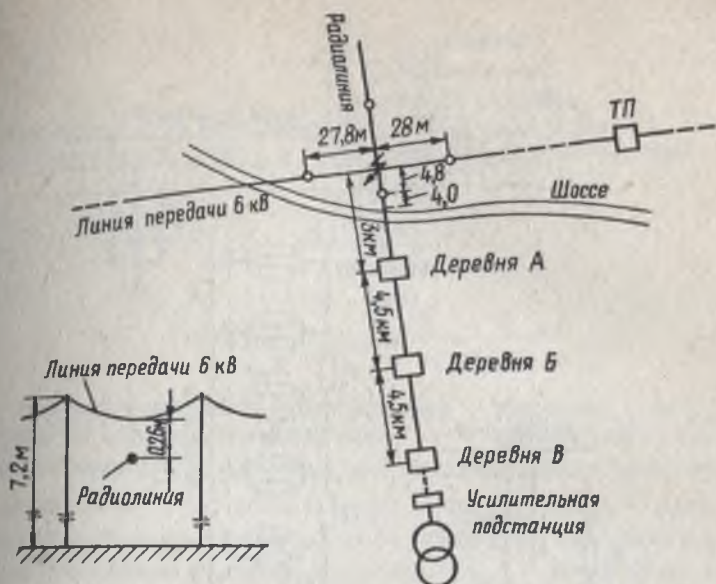


Рис. 5.8. Общая схема пересечки ЛЭП с проводами радиотрансляционной сети
ТП — трансформаторная подстанция

подсчитать напряжение относительно земли. Возможные при этом погрешности не могут существенно повлиять на численные результаты. Точность определения напряжения прикосновения можно признать вполне достаточной. На рис. 5.10 показана эквивалентная расчетная схема. Она описывается уравнениями, приводимыми далее. До схлестывания проводов радиосеть была включена во всех трех деревьях А, В и В. Напряжение прикосновения определяется из формул:

$$\dot{u}_{\text{пр}A}''' = K''' [r_2^2 + R_3 (Cr_2 + R_3)] e^{j\alpha'''};$$

$$\dot{u}_{\text{пр}B}''' = K''' R_3 (r_2 + R_3) e^{j\alpha'''};$$

$$\dot{u}_{\text{пр}B}''' = K''' R_3^2 e^{j\alpha'''},$$

где

$$K''' = \frac{\dot{u}_{A0} \cdot 3\omega CR_3}{[r_2^2 + R_3 (4r_2 + 3R_3)] \sqrt{1 + (3\omega CR''')^2}};$$

$$R''' = r_1 + R_3 \frac{r_2^2 + R_3 (3r_2 + R_3)}{r_2^2 + R_3 (4r_2 + 3R_3)};$$

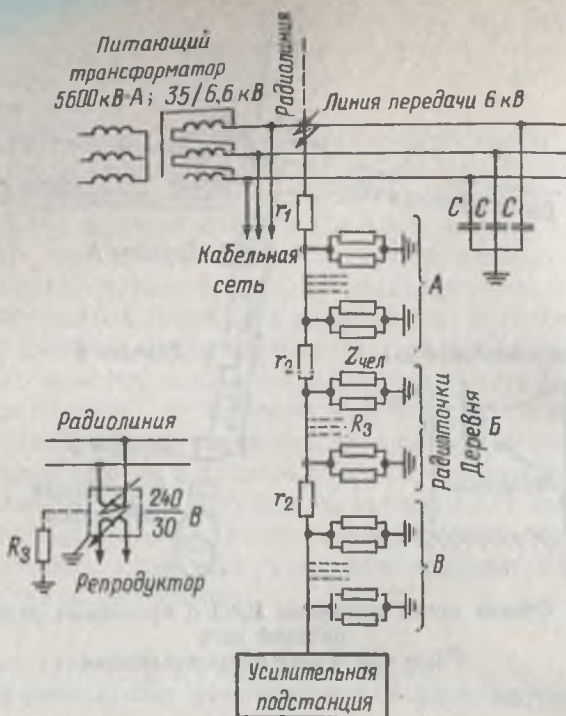


Рис. 5.9. Электрическая схема пересечки
 R_3 — электрическое сопротивление заземления; $Z_{чел}$ — электрическое сопротивление тела человека

$$\operatorname{tg} \alpha''' = \frac{1}{3\omega CR'''}.$$

Если теперь предположить, что возникшее напряжение вызвало появление в деревне А токов замыкания, в результате чего выгорели провода и радиосеть отключилась, то напряжение прикосновения в оставшихся двух деревнях изменится и будет определяться уравнениями:

$$\dot{u}_{прБ}'' = K'' (r_2 + R_3) e^{j2\alpha''}; \quad \dot{u}_{прВ}'' = K'' R_3 e^{j2\alpha''},$$

где

$$K'' = \frac{\dot{u}_{A0} \cdot 3\omega CR_3}{(r^2 + 2R_3) \sqrt{1 + (3\omega CR'')^2}};$$

$$R'' = r_1 + r_2 + R_3 \frac{r_2 + R_3}{r_2 + 2R_3};$$

$$\operatorname{tg} \alpha'' = \frac{1}{3\omega CR''}$$

Допустим, что токи замыкания появились в деревне *Б*. Тогда напряжение в оставшейся деревне *В* можно найти из формулы

$$\dot{u}'_{\text{пр}B} = \frac{\dot{u}_{A0} \cdot 3\omega CR_3}{\sqrt{1 + (3\omega CR')^2}} e^{j\alpha'}$$

где

$$R' = r_1 + 2r_2 + R_3; \quad \operatorname{tg} \alpha' = \frac{1}{3\omega CR'}$$

Сделаем пояснение к формулам: знак $\overline{}$ обозначает работу радиосети во всех трех деревнях; знаки $\overline{}$ и $\overline{}$ — соответственно в двух и одной деревне; $\dot{u}_{\text{пр}A}$ — напряжение прикосновения на радиоточках в деревне *А*, когда радиосеть работает всюду; $\dot{u}_{\text{пр}B}$ и $\dot{u}_{\text{пр}B}$ — соответственно напряжения прикосновения на радиоточках в деревнях *Б* и *В*, когда отключалась радиосеть в деревне *А*; $\dot{u}'_{\text{пр}B}$ — напряжение прикосновения на радиоточках в деревне *В*, когда отключалась радиосеть в деревнях *А* и *Б*; $\dot{u}_{A0}$ — символическое обозначение фазного напряжения (фаза *А*) источника, равного 3800 В; ω — угловая частота линии передачи; r_1 , r_2 и R_3 — см. рис. 5.10. Напряжение прикосновения при различных комбинациях включения радиоточек по трассе фидера радиосети находится в пределах 0,03—1100 В.

Анализ показал, что в радиосети возникли опасные напряжения не только для аппаратуры, но и для людей. Они и вызвали поражения электрическим током.

Последствия этих поражений оказались столь тяжелыми потому, что деревни были расположены сравнительно недалеко от пересечки. Ток замыкания на землю ограничивался сопротивлением радиолинии, и цепь замыкания на землю длительное время не отключалась, в то

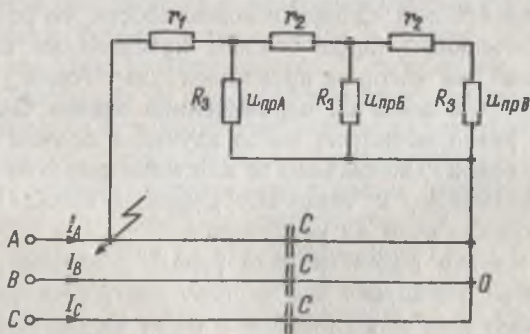


Рис. 5.10. Эквивалентная расчетная схема

время как напряжение на радиолинии относительно земли было достаточно велико.

Как же устранить возможность появления опасных напряжений? Снизить их можно устройством заземления разрядника на двух опорах радиосети, между которыми существует пересечка, что и предусмотрено действующими правилами устройства линий электропередачи. При появлении в радиосети относительно земли повышенного напряжения разрядник срабатывает, соединяя радиосеть с землей. Как показал расчет, при сопротивлении разрядников 10—15 Ом напряжение прикосновения в рассматриваемых условиях может быть снижено в несколько раз, и тогда поражения с тяжелым исходом становятся маловероятными. Однако полностью опасность при этом не устраняется. Радикальным решением задачи является лишь сооружение кабельных переходов через линии радиосвязи и радиотрансляции.

Электрические удары. Аналитический метод был применен и при упомянутом в § 5.1 инструментальном изучении электрических ударов, предпринятом нами на четырех машиностроительных заводах.

Для изучения были взяты предприятия с установленной мощностью электродвигателей примерно по 5000 кВт·А. В течение двух лет в отделах главного энергетика этих предприятий, а также в обслуживающих их здравпунктах регистрировались электрические удары, и специально выделенные сотрудники проводили первичное обследование как пострадавших, так и оборудования, на котором произошел удар. Одновременно заполнялись анкеты-вопросники. Затем производилось инструментальное исследование с привлечением специалистов.

Работа проходила не без трудностей. Ведь если для расследования электротравм, приводивших к серьезным последствиям (к утрате трудоспособности, а тем более к смерти), предоставлялись все условия и возможности, то расследование электрических ударов особого интереса не вызывало: оборудование, на котором произошел удар током, отключалось неохотно и лишь на ограниченное время. Однако это отношение резко менялось, когда изучение причин того, почему «бьет током», вскрывало те или иные дефекты оборудования, показывало, к чему эти дефекты могли привести, и устанавливало пути их устранения.

Очень многим содействовали успеху исследований сами пострадавшие, поскольку они хорошо знали особенности обслуживаемого ими оборудования и были весьма заинтересованы в устранении его дефектов, угрожающих их здоровью.

Чтобы установить хотя бы приблизительно соотношение между числом электрических ударов и числом тяжелых травм, было решено собранные по четырем предприятиям данные распространить на 66 аналогичных предприятий, по которым имелись сведения о тяжелом травматизме за 15 лет. Для этого число электрических ударов, зарегистрированных на четырех обследованных предприятиях, разделили сначала на четыре (число предприятий), а затем на два (два года наблюдений), полученное частное умножили сначала на 66 (число сходных по профилю, числу рабочих и технологии предприятий) и затем на 15 (число лет, за которое имелись данные об электротравмах на 66 предприятиях).

Учитывая, что в определении числа электрических ударов допущена некоторая условность, можно ориентировочно оценить только пределы соотношения. Оказалось, что один смертельный исход приходится на 140—150 тыс. случаев возникновения электрической цепи через тело человека.

Работа по определению числа электрических ударов была проведена с 1951 по 1953 г. Выборочный анализ электрических ударов, сделанный на тех же предприятиях в 1957—1958 гг., показал, что число электрических ударов уменьшилось почти вдвое. Число же электротравм сократилось в меньшей степени. Эта тенденция характерна и для последующих лет. По-видимому, в настоящее время на одну электротравму с тяжелым исходом приходится еще меньшее число электрических ударов. Можно полагать, что на каждом двух взрослых работающих людей ныне приходится ежегодно не больше чем по одному удару током.

Это можно объяснить значительным повышением уровня эксплуатации сетей напряжением ниже 1000 В, в которых и происходит основное число электротравм. Действительно, именно за последние годы ужесточились требования к профилактическим измерениям сопротивления изоляции. На ряде предприятий организованы испытания изоляции повышенным напряжением. Большинство заводов и фабрик усиленно модернизирует электрооборудование. К сожалению, эти сдвиги почти не затронули ни сельское хозяйство, ни коммунальные предприятия, ни строительство, где число электрических ударов не только не снижается, но даже растет.

Электротравмы с тяжелым исходом происходят иногда при тех же токах и напряжениях, которые в многочисленных случаях прохождения электрической цепи через тело человека вызывают только неприятное раздражение. Это объясняет неблагополучие с электробезопасностью в тех отраслях народного хозяйства, где велико число электрических ударов.

Выводы из инструментального расследования электротравм. Тщательный и разносторонний инструментальный анализ любого поражения электрическим током важен не только тем, что дает возможность выявить «очаги опасности» на данном предприятии и обосновать эффективные защитные мероприятия. Огромное значение имеет и то, что анализ материалов, собранных в результате большого числа подобных расследований, расширяет наши представления о механизме действия электрического тока на человека.

Несомненно, что с ростом напряжения установки опасность поражения увеличивается, но эта закономерность не так уж проста. Рассмотренные случаи убеждают, например, в опасности малого напряжения. Результаты инструментального изучения показывают, что смертельные исходы имеют место в сетях 12, 36 и 65 В. При сварочном напряжении (65 В) число их достаточно велико.

Инструментальное изучение обстоятельств происшествий устанавливает, далее, значительное расхождение между напряжением установки и поражающим напряжением: последнее всегда меньше напряжения сети.

Изучение истинных значений поражающего напряжения убедительно, на большом числе электротравм, показало появление серьезных специфических ожогов на теле человека, особенно в некоторых акупунктурных зонах, когда соприкосновение с токоведущими частями, находящимися под напряжением, возникало через одежду и обувь. Характер поражения существенно отличен от обычного термического ожога. Он различен и в случаях, когда электрическая цепь через тело человека возникла при жизни или посмертно. Об этом свидетельствуют визуальные наблюдения, нашедшие полное подтверждение при микроскопической оценке образцов пораженных участков кожи. Это очень важно учитывать в ходе судебно-медицинской экспертизы, о чем уже говорилось в § 2.4 при обсуждении примера 2.4.

Существенны различия в электроожогах в зависимости от рода и значения тока. При малых значениях тока зона ожога больше, а исход травмы тяжелее от переменного тока, нежели от постоянного. При больших токах соотношение обратное.

Отсутствие прямой зависимости исхода поражения от напряжения ставит под сомнение широкое распространение таких мероприятий, как применение пониженного напряжения без дополнительной защиты.

На сварочных агрегатах, высокочастотных и других установках электротравматизм может быть эффективно снижен путем внедрения надежных блокировок, снимающих напря-

жение в особых случаях, например при необходимости ремонта или технологических операций, предусматривающих соприкосновение работающего с токоведущими частями.

В ходе инструментального изучения электротравм с несомненностью установлено и то, что время, в течение которого ток до 20 мА вызывает смертельный исход в момент поражения, не превышает 0,2—0,3 с. При большем токе это время еще меньше. Но отмечены случаи, когда ток, измерявшийся не миллиамперами, а амперами, «не убивал» пострадавшего в момент поражения. Появлялись судороги, и пострадавшего удавалось спасти снятием напряжения.

Таким образом, накоплен обширный материал, свидетельствующий об отсутствии прямой зависимости между исходом поражения, с одной стороны, и напряжением, током, мощностью (иногда при мощности в милливатты наступает смерть, а при мощности в киловатты — нет) и поглощенной энергией — с другой.

Число факторов, определяющих значения поражающих напряжения и тока, весьма велико. Среди них: чрезвычайно низкое (несколько вольт) пороговое значение безусловно безопасных напряжений; весьма высокое (100 кВ) пороговое значение напряжения, при котором еще наблюдаются благополучные исходы. Очевидна, наконец, зависимость исхода поражения от сложного комплекса трудно учитываемых физических и физиологических явлений. Все это дает основание выдвинуть в технике электробезопасности положение о нецелесообразности нормирования в промышленности и в быту опасных и безопасных пороговых значений напряжения и тока. На этот путь уже встала, по существу, радиационная защита, требующая, чтобы проникающее излучение не выходило далеко за пределы естественного фона.

Применительно к электробезопасности такой взгляд не исключает перехода на более высокие напряжения, конечно, при условии выполнения соответствующих защитных мероприятий. Это не только экономически целесообразно, но и разумно с точки зрения электробезопасности. Реализация выдвинутого положения требует значительного повышения конструктивной и эксплуатационной надежности электрооборудования. Уровень изоляционной техники и особенно темпы ее развития позволяют это сделать. Соответственно подлежит развитию и система профилактических испытаний и ремонтов. Подробнее эти предложения будут обоснованы в главах десятой и одиннадцатой.

Наконец, назрела необходимость разработки специализированных положений электробезопасности, прежде всего для

строительства, электрохимической промышленности, сельского хозяйства, бытового и коммунального электропользования. Неотложным делом представляется также издание массовым тиражом общедоступной литературы, разъясняющей опасность электрического тока, объясняющей сущность и смысл применения защитных мероприятий.

Глава шестая

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА

6.1. Первые исследования

О том, что электричество действует на человека, известно давно. Первая монография на эту тему (1600 г.) принадлежит английскому врачу и физику У. Гильберту. Автор описывает благотворное действие статического электричества, источником которого служили электрофорные (электростатические) генераторы. Он считает, что статическое электричество воздействует на человека своеобразно: помимо непосредственного влияния электрического поля, имеет значение и озон, содержание которого в воздухе увеличивается в результате работы электрофорных машин.

В течение почти трех столетий электричество рассматривается преимущественно как лечебное средство. После работ Л. Гальвани главным направлением в изучении электричества применительно к медицине становится диагностика.

Смертельное поражение пациента «разрядом искры» в одном из электрических лечебных кабинетов, созданных французским предпринимателем Г. Монсоре, привлекает внимание французских и немецких ученых. Исследование этого случая поручается Ж. Марату — врачу, вошедшему в историю Великой французской революции конца XVIII века как один из вождей якобинцев. Интереснейшие результаты его наблюдений публикуются в трудах Французской академии наук. В статье «О действии электрицизма на человека» Ж. Марат указывает, что «лечебные свойства» статического электричества в основном обусловлены не озоном, а психогенным фактором — мистической обстановкой помещений, в которых производилось электролечение. После этого разоблачения Г. Монсоре исчезает из Парижа, и дальнейшая судьба его неизвестна.

Большая заслуга в дальнейшем изучении электричества применительно к медицине принадлежит нашему соотечественнику В. В. Петрову, имя которого уже упоминалось в § 2.1. Налаживая в 1802 г. созданную им «гальвани-вольтовскую батарею», В. В. Петров случайно касается токоведущих частей этого источника электрической энергии, получает сильный электрический удар и теряет сознание. Энергичными мерами удается избежать трагического исхода. Оценив значение происшедшего, В. В. Петров в своей книге «Известия о гальвани-вольтовых опытах» (СПБ, 1803) не только подробнейшим образом описывает этот случай, но и пытается определить численное значение напряжения, могущего вызвать тяжелый исход *. Работа В. В. Петрова по достоинству оценена учеными мира: она имеется в национальных библиотеках Англии, Франции, Италии, на нее ссылаются до сих пор в исследованиях, посвященных действию электрического тока на живой организм. Не остается она без внимания и в самой петербургской Медико-хирургической академии, где работал В. В. Петров. Так, один из ее профессоров — Савва Большой проводит в развитие работ В. В. Петрова интересные исследования, которые, к сожалению, прерываются ссылкой их автора в Сибирь за поддержку студенческих забастовок.

В 1862 г. француз Леруа де Меркюр опубликовал подробное описание травмы, вызванной электрическим током. Перевод его статьи был опубликован в одном из первых номеров журнала «Электричество». Затем последовали аналогичные публикации в журналах других стран. Авторы описывали несчастные случаи, вызванные электрическим током и сопровождавшиеся смертельным исходом. В этих описаниях указывалось, что электрический ток может вызвать мгновенную и безболезненную смерть человека, не оставляя в ряде случаев никаких следов на теле пострадавшего. Были проведены опыты на животных, результаты которых косвенно подтвердили указанные описания исходов поражения при несчастных случаях.

Этого было достаточно, чтобы власти США заменили повешение казнью на электрическом стуле. Полной неожиданностью оказалось сообщение американского тюремного

* По заданию Академии наук СССР эта батарея была воспроизведена в 1952 г. в натуре, что позволило определить параметры вырабатываемой ею электрической энергии. Напряжение оказалось равным 1650—1700 В.

врача, по долгу службы присутствовавшего в течение 20 лет при исполнении приговоров, что на самом деле электрокабель является и жестокой и мучительной. Косвенно это признавалось и инструкцией тюремных властей США, разрешавшей лишать приговоренного жизни и другим способом, если смерть от электричества не наступала сразу. Несмотря на все это, электрокабель существует в США и поныне.

6.2. Опыты на животных и допустимость распространения полученных данных на человека

Начало XX века было временем широких, массовых исследований действия электрического тока на животных. Достаточно убедительно было доказано, что ток 100 мА является для них смертельным.

Именно к такому выводу привело солидное исследование, проведенное еще в 30-х годах в США [92]. Его авторы Л. Феррис и другие экспериментировали на нескольких тысячах животных (мыши, кролики, кошки, собаки, овцы и др.). Авторы этого труда прямо не сопоставляют результаты изучения действия электрического тока на сердце животного с данными о действии электрического тока при казни людей на электрическом стуле, но из текста статьи можно заключить, что такое сопоставление они сделали и существенных противоречий не установили. Да и условия проведенных ими экспериментов в какой-то степени имитировали казнь на электрическом стуле. Тело животного жестко закреплялось в специальном станке, шерсть под электродами состригалась, напряжение составляло около 1000 В.

Однако вскоре после того, как учеными было высказано категорическое утверждение о смертельной опасности тока 100 мА, в печати появились сообщения, авторы которых, расследуя смертельные поражения при электротравмах, установили, что одни люди погибают от значительно меньшего по значению тока, а другие выживают, оказавшись в цепи значительно большего тока. Примеры такого рода были приведены в пятой главе нашей книги.

Первый, кто сделал попытку снять имеющиеся противоречия в оценке опасности электрического тока для человека, был австрийский ученый С. Еллинек [22]. Проанализировав большое число несчастных случаев, он пришел к выводу, что тяжесть исхода поражения человека электрическим током в значительной степени обусловлена состоянием его нервной

системы в момент поражения. Он указал далее, что тело человека обладает электрическим сопротивлением, принципиально отличным от электрического сопротивления металлических проводников, электролитов (а теперь можно сказать — и полупроводников), представляя собой сложнейшую комплексную систему со всеми видами электропроводности, находящуюся в состоянии постоянного изменения и преобразования во времени.

С. Еллинек, а за ним и другие исследователи, среди которых можно назвать А. Сант-Дьёрдьи [63], С. Кёппена [99, 100], П. Осипку [109], Х. Швана [111], Дж. Купфера [103, 104], а из отечественных — Г. Л. Френкеля [75] и К. А. Ажибаева [3], показали всю сложность переноса на человека результатов наблюдений за действием электрического тока на различных животных. Моделирование на животном характеризует один или несколько опасных для жизни человека параметров, но не позволяет оценить одновременно весь комплекс параметров электрической цепи, определяющих ее опасность для человека, и охарактеризовать особенности поражения человека при электротравмах.

Фиксация тела. Неожиданности появляются уже при рассмотрении условий воздействия электричества на живой организм. В опытах животное, как правило, жестко фиксировали в станке. Так поступали уже упомянутые Л. Феррис с соавторами, так поступал и С. Еллинек. Он накладывал электроды на участки кожи передних и задних лап кошки, освобожденные от шерсти. В одних случаях кошку укладывали перед этим на спину на стол и ремнями закрепляли в станке, исключая возможность движения. Животное предпринимало безуспешные попытки освободиться. В этот момент к электродам подключали провода от регулируемого источника напряжения. После подачи напряжения тело кошки вздрагивало и грудная мускулатура напрягалась, наступала ее контрактура. Животное погибало с поднятием напряжения до 220 В, да и то лишь через 15—20 мин после начала опыта. В других случаях электроды накладывали таким же способом, но животное не закрепляли в станке, оставляя ему свободу движений; оно успокаивалось и даже начинало дремать. Подавали напряжение, которое не превышало 30—40 В. После резкого прыжка вверх животное мгновенно погибало.

Это доказывало, что условия образования цепи отражаются на исходе травмы. Не исключено, что центральная нервная система животного по-разному реагирует на ток в зависимости от того, в каком состоянии — бодрствования

или дремоты оно находится. Но ведь у человека нервная система организована несравненно сложнее, чем у кошки, и психофизиологическое состояние организма должно оказывать на исход травмы особенно большое влияние.

Фактор внимания. В своих опытах над животными С. Еллинек выявил роль фактора внимания в исходе электротравмы. Те из животных, которые находились в спокойном состоянии и не ждали беды, погибали от малого напряжения, а те, которых дразнили палкой и при этом подавали напряжение 220 В, воспринимали удар электрического тока как удар палкой, приходили в ярость и бросались на экспериментатора. Описываемый опыт был нами многократно повторен и подтвержден.

Говоря о спасительном факторе (феномене) внимания, С. Еллинек указывал, что для обороны от опасного раздражителя мобилизуются внутренние ресурсы животного. Тем самым он развивал идею о господствующем значении центральной нервной системы в исходе электротравмы. Красноречиво его утверждение: «Не всякий ток убивает, но всякий ток может убить». В несколько измененном виде оно звучит так: «Случайно погибнуть от электрического тока легко, намеренно же убить человека током крайне трудно».

С. Еллинеку удалось выявить значение фактора внимания и в ходе производившихся им расследований несчастных случаев от электричества. Он писал:

«Главная особенность электротравмы в том, что напряжение нашего внимания, наша твердая воля в состоянии не только ослабить действие электрического тока, но иногда совершенно его уничтожить... Сокрушительную силу падающей балки или взрыва нельзя ослабить мужеством и героической выдержкой, но это вполне возможно по отношению к действию электрического удара, если он наступает в период напряженного внимания... Действительно, тот, кто слышит выстрел, не видя стреляющего, может погибнуть от внезапно наступившего шока, тот же, кто смотрит на стреляющего или сам стреляет, шоку не подвержен» [22].

Здесь имеется в виду не так называемое произвольное внимание, которое вызывается каким-нибудь неожиданным событием, а то внимание, которое усилием воли направляется нами на ожидаемые явления, события и раздражения.

«Фактор внимания,— писал С. Еллинек,— играет чрезвычайно большую, может быть, решающую роль...» и далее: «с тем, кто находится в состоянии сосредоточенного внимания, обыкновенно ничего не случается... Он противопоставля-

ет свое внимание, как щит, страшному моменту, который может произойти».

Англичане говорят: «A man, whose mind is prepared, is worth two» («Человек, ум которого подготовлен, стоит двух»). Эту же мысль они выражают и другими словами: «Forewarned is forearmed» («Заранее предупрежденный — заранее вооруженный»). Аналогичное выражение имеется и у французов: «Un homme averti vaut deux» («Предупрежденный человек стоит двух»).

Приведенный нами выше пример 5.7 весьма убедительно иллюстрирует сказанное.

Интересные данные о роли фактора внимания в исходе электротравм получены Р. А. Ведентьевой [11], экспериментировавшей под руководством известного патофизиолога Г. Ю. Белицкого. Опыты проводились на собаках. Замыкание через тело животного электрической цепи напряжением 120 В переменного тока вызывало судороги, а вслед за этим и патологическую реакцию — повышение проницаемости сосудов. Особенностью эксперимента было то, что замыканию цепи предшествовала подача условного сигнала, предупреждавшего подопытное животное о предстоящем воздействии. В результате предупреждения изменялась упомянутая выше патологическая реакция. Характер этого изменения, как удалось установить, зависел от значения тока: при токе 1—2 А реакция ослабевала, а при токе 1—2 мА, что лишь незначительно выше порога физиологического действия, реакция усиливалась. Это означало, что предупреждение как бы сглаживает разницу в силе реакций: ослабляет сильную и усиливает слабую.

Значение фактора внимания находит подтверждение и в других исследованиях. Это особенно ценно тем, что многие «таинственные» электротравмы находят благодаря учету фактора внимания достаточно убедительное объяснение, облегчая тем самым разработку и внедрение защитных мероприятий. К сожалению, ряд крупных исследователей действия электрического тока на животных, используя полученные ими данные, при установлении критерия опасности электрического тока для человека не учитывают роли фактора внимания. К таким ученым следует отнести Дж. Купфера [104], П. Осипку [109], С. Кёппена [99, 100], Ц. Дальзиеля [91], Х. Крамера и других [102].

Окружающая среда. Плодотворно использует опыты на животных для познания механизма воздействия электрического тока на человека киргизская школа патофизиологов, основанная Г. Л. Френкелем. Внимание, уделяемое Акаде-

мией наук Киргизской ССР проблемам электротравматизма, далеко не случайно. Эта советская республика обладает огромными гидроэнергоресурсами, превышающими гидроэнергоресурсы целой Франции. Вместе с тем рельеф этой страны — высокие горы, узкие ущелья и широкие равнины — определяет наличие в ней самых различных климатических зон при частых и резких изменениях атмосферных явлений. Нечего говорить, что в этих условиях широкое использование электричества на производстве и в быту создает весьма пестрый фон для электропатологии.

Многолетними экспериментами и наблюдениями патофизиологи Киргизии доказали, что повышение температуры окружающей среды (юг СССР) и снижение атмосферного давления (высокогорье) резко повышают чувствительность к току, тогда как понижение температуры и повышение атмосферного давления оказывают обратное действие — понижают ее [4].

Исследователи той же школы достаточно убедительно доказали, что адаптация к условиям высокогорья существенно зависит от гормонального состояния человека и животных.

Плодотворно поработали ученые Киргизии и над определением сравнительной опасности постоянного и переменного тока. Они доказали, что при равных напряжениях переменный ток частотой 50 Гц опаснее постоянного. Этот вывод отлично согласуется с результатами анализа параметров поражения при электротравмах. Объяснение заключается в том, что поражающим фактором является амплитуда тока, а не его действующее значение, по которому обычно сравнивалось действие переменного и постоянного тока. Но это не единственное объяснение. Правомочно полагать, что исход поражения обусловлен и переменной знака самого тока. Изучение роли частоты тока в исходе поражения открывает новые возможности в оценке воздействия электричества на «живое» и «неживое».

Серьезным обобщением трудов Г. Л. Френкеля и созданной им школы патофизиологов стала монография К. А. Ажибаева [3], название которой «Физиологические и патофизиологические механизмы поражения электрическим током» показывает, насколько широко ученые этой небольшой окраинной республики Советской страны рассмотрели интересующую нас проблему. Прекрасно дополняет указанный труд монография представителя той же школы М. Т. Туркменова [72]. Опыт киргизских патофизиологов заслуживает, на наш взгляд, его использования.

6.3. Лечение людей, перенесших электротравму,— источник познания механизма действия электрического тока

Если мы сравним электротравмы, закончившиеся смертельным исходом, с ударами тока, проходящими у множества людей без каких-либо последствий, и учтем влияние фактора внимания на ход событий, то сделаем однозначный вывод, что травмирующее действие тока опосредуется прежде всего действием его на центральную нервную систему.

Процесс и исход лечения лиц, оказавшихся в электрической цепи, убедительно подтверждают только что сделанный вывод, хотя многие данные наблюдений не укладываются в бытующие в литературе представления о механизме действия электрического тока. Это не должно нас смущать, ибо упомянутые представления во многом основаны на знании электрических сопротивлений неживой природы — металлов, электролитов, полупроводников. Мы же, исследуя электротравму, имеем дело с совершенно иным объектом — живым организмом.

Разница тут огромна, в доказательство чего сошлемся хотя бы на фактор внимания, рассмотренный в § 6.2. Уже указывалось на большое значение его в исходе электротравм. Но в опыте на кошке, описанном выше, животное все-таки погибало, когда условия воздействия ужесточались. По-видимому, помимо общей реакции центральной нервной системы, существенное значение имеет и непосредственный спазм мозговых и других коронарных сосудов, питающих жизненно важные системы и органы. Уподобив нервную ткань и коронарную систему органическим полимерам, имеющим симметричные энергомoleкулярные связи, мы вправе предположить, что необратимые изменения сложной электронной, электронно-ионной и электронно-дырочной проводимости, а также непрерывный процесс перехода крови из упорядоченного в неупорядоченное состояние и другие грозные процессы нарушения жизнедеятельности могут вызываться даже очень малыми токами. Пусть косвенным, но весьма убедительным доказательством этой гипотезы являются результаты исследования [63], показывающие, что смертельные исходы могут наступать при токе в электрической цепи через тело, равном всего 100 мкА.

Автор книги представляет, что от гипотезы, даже очень заманчивой и убедительной, перейти к обоснованной теории нелегко. Вот почему изучение лечения несмертельных электротравм в этом плане может открыть новые пути познания

«живого» и «неживого» и возможности устранения многих противоречий, наличествующих сейчас в понимании механизма поражения человека электрическим током. Но уже бесспорно одно: распространенная ныне точка зрения, будто границей безопасного и безусловно опасного тока является значение 100 мА, не имеет под собой достаточного научного обоснования, поскольку она не учитывает всей сложности биофизических, физиологических и патофизиологических особенностей человека. Эти особенности, явственно обнаруживающие себя в процессе лечения электротравм с тяжелым и легким исходом и особенно их осложнений, убедительно подтверждают точку зрения автора. Уже сама длительность процесса лечения электротравм, равно как и неожиданные последствия поражения электрическим током для различных жизненно важных систем, находящихся, судя по данным инструментальных исследований, вне зоны непосредственного прохождения электрического тока, говорят о многом. По своей сложности, исходу и последствию электротравмы относятся к сложнейшим поражениям человеческого организма. Тем поучительнее приводимые далее примеры, взятые из материалов наблюдений, проведенных автором, а также из литературных источников, к сожалению, малоизвестных широкому кругу специалистов, в том числе даже лицам электропрофессий.

Пример 6.1. 20-летний электромонтер Ц. прикоснулся к изолирующей трубе, которая вследствие сильного увлажнения стала токопроводящей, и оказался под напряжением 220 В относительно земли. Электрическая цепь через тело человека возникла по схеме «правая рука — нога». Снять напряжение с пораженного удалось через несколько минут отключением разъединителей. Пострадавший, потерявший было сознание, быстро пришел в себя и, не обратившись за медицинской помощью, продолжал работу. Электрометок ни на руке, ни на ногах не было. В течение часа после происшествия он чувствовал себя нормально, но затем ощутил сильную усталость, появились колющие и сжимающие сердце боли, быстро возраставшие. Через два часа после травмы был вызван врач, который установил приступ тахикардии, признал пострадавшего нетрудоспособным, предписал ему строгий постельный режим, назначил лечение сосудорасширяющими и ритмизирующими средствами. Вскоре боли и тахикардия прошли.

Через 5 дней пострадавший приступил к работе, но уже во второй половине дня боли в области сердца вновь появились. Больной был госпитализирован. Клиническое обследование, включая и электрокардиографическое, не выявило никакой патологии. Пострадавший находился в больнице в течение четырех недель, боли стали отмечаться лишь при физических нагрузках, например при взбегаании на лестницу, а затем, после выписки из больницы, — при езде на велоси-

пеле, подъеме тяжестей. Лечение продолжалось 50 дней, после чего трудоспособность полностью восстановилась. В последующее время после лечения жалоб на боли в сердце не было. Заключительный диагноз: «Функциональная электротравматическая стенокардия».

По данным С. Кёппена, подобный вид стенокардии приводит к потере трудоспособности на месяц и более. Обращает на себя внимание тот факт, что все случаи такой стенокардии, наблюдавшиеся этим автором, вызывались напряжением 220 В и менее; в одном случае — напряжением 85 В (травма произошла на экспериментальной электротехнической установке, точное значение поражающего напряжения которой было весьма несложно установить).

Представляет интерес, что лица, перенесшие электротравматическую стенокардию, утверждали, что прикосновение пальцев к токоведущим частям, находившимся под напряжением 220 В, не сопровождалось сколько-нибудь сильным и болезненным раздражающим действием. Значения поражающих токов были ориентировочно установлены в пределах единиц миллиампер. Эти сведения не противоречат данным, приводимым в других источниках.

Пример 6.2. Стоя на проводящем полу, человек правой рукой (по-видимому, тыльной стороной ладони) коснулся токоведущей части оборудования, находившегося под напряжением 127 В относительно земли. Возникли судороги, сопровождающиеся потерей сознания. Но затем сознание восстановилось. Пострадавшему была своевременно (через 10—13 мин) оказана квалифицированная медицинская помощь. Следы тока на теле пострадавшего не были выявлены. Казалось, электротравма не дала последствий. Однако через несколько дней пострадавший начал жаловаться на одышку при ходьбе и на боли в области сердца. После лечения сосудорасширяющими средствами при постельном режиме состояние улучшилось, но боли в области сердца и одышка при ходьбе давали себя знать на протяжении 1,5—2 месяцев после электротравмы. Ранее у пострадавшего болей в сердце не было. Снятая сразу после происшествия электрокардиограмма (в противоположность ранее приведенному примеру) выявила нарушение кровоснабжения и коронарную недостаточность. Эти болезненные проявления, судя по последующим электрокардиограммам, продолжались в течение полутора лет. Улучшение здоровья не раз сменялось резким ухудшением сердечной деятельности.

Судя по описанию, сделанному О. М. Кранской и Л. С. Мухомовым, и здесь наблюдалась функциональная электротравматическая стенокардия, но протекавшая слабее, чем описанная в примере 6.1. Итак, это еще одно подтверждение многообразного характера нарушения нервной системы, управляющей сердечно-сосудистой системой.

в клинику через 45 дней после травмы. Госпитализирован по поводу гранулирующей раны в области первого (большого) пальца левой кисти. Основная фаланга пальца обнажена, пястно-фаланговый сустав вскрыт. Электротравму получил во время работы: прикоснулся левой кистью к оголенному проводу, который находился под напряжением 220 В. В клинике после обработки раны произведена операция — иссечение остатков неотторгнувшихся мертвых тканей и итальянская пластика (лоскут выкроен в области левой половины брюшной стенки).

Выписан из клиники по выздоровлении через 55 дней после поступления и через 100 дней после травмы с удовлетворительной функцией левой кисти.

Пример 6.8. Электрик К., 28 лет, поступил в клинику через час после электротравмы (ток напряжением 6 кВ). Сознание затемнено, пульс 92 удара в минуту, слабого наполнения и напряжения. Тоны сердца приглушены. Артериальное давление 135/70 мм рт. ст. Число дыхательных движений 27 в минуту. Со стороны брюшной полости патологических изменений не выявлено.

В области левого предплечья — большой дефект на передненаружной поверхности (след входа электрического тока), обугливание мышц и костей, обнажены локтевая и лучевая кости. Кисть холодна на ощупь, чувствительности нет. В левой подмышечной области след прохождения электрического тока (участок серо-белого цвета 6 × 10 см). Плечо отечно, кожа нечувствительна до его средней трети. На стопах обнажены концевые фаланги первых пальцев.

Клинический диагноз: электротравма, электроожоги левой верхней конечности и обеих стоп, в общей сложности обожжено около 10 % всей площади кожи.

После того как удалось улучшить общее состояние больного, была произведена операция в области левого предплечья и плеча. На четвертый день после электротравмы внезапно началось кровотечение из плечевой артерии. При ревизии раны в области плеча установлено обширное омертвление почти всех мышц, в том числе и большой грудной мышцы. В связи с этим была произведена перевязка подключичной артерии, плечо ампутировано на границе верхней и средней трети. При осмотре и гистологическом исследовании препарата установлено разрушение наружной пластинки плечевой кости, множественные кровоизлияния в костном мозгу. Магистральные сосуды предплечья в области локтевого сустава тромбинированы. Стенка плечевой артерии стала хрупкой.

На 21-й день с момента травмы произведена экзартикуляция I, II, III пальцев обеих стоп, иссечены нежизнеспособные ткани на тыльной и подошвенной поверхностях левой стопы и вскрыты гнойные затеки. Однако ткани в области культи левого плеча и обеих стоп оставались нежизнеспособными, гнойные затеки развились, возник сепсис, из-за чего пришлось прибегнуть к реампутации плеча и ампутации голеней. Больной выписан на 132-й день после электротравмы с потерей трудоспособности.

Пример 6.9. Инженер Ж., 49 лет, доставлен в клинику через месяц после травмы. На работе коснулся правой рукой провода.

находившегося под напряжением 10 кВ, и упал на колени (дуга: правая рука — оба коленных сустава).

Поступил в клинику в удовлетворительном состоянии. В области ладонной поверхности пальцев — активная эпителизация меток тока. В области левого коленного сустава, на передней поверхности — рана размером 4×5 см, дном которой является некротизированный надколенник. На передней поверхности правой голени, ниже бугристости большеберцовой кости — рана (2×2 см), покрытая грануляциями.

Через шесть дней после поступления произведена операция — тангенциальная остеонекрэктомия левого надколенника и иссечение с ушиванием раны в области правой голени. В последующем произведена свободная кожная аутопластика гранулирующей раны в области надколенника.

На 43-й день с момента поступления в клинику и на 73-й день с момента электротравмы выписан в удовлетворительном состоянии с сохранившейся благодаря удачно сделанной операции функцией коленного сустава.

Пример 6.10. Электромонтер В., 35 лет, поступил в клинику на второй день после электротравмы в крайне тяжелом состоянии с выраженным двигательным возбуждением, без сознания. На работе взялся за провод, находившийся под напряжением 380 В, и тотчас потерял сознание.

Местно: на лбу (больше справа) — обширная ожоговая рана (20×6 см), края ее гиперемированы, приподняты. В центре раны — некротический струп черного цвета. Отек в области правого глаза. На передней поверхности шеи, в проекции щитовидной железы — рана (4×5 см), в центре которой — участок некроза темного цвета.

Первые восемь дней, несмотря на активно проводившееся лечение, общее состояние больного оставалось тяжелым. На девятый день были иссечены некротические ткани на передней поверхности шеи. Магистральные сосуды шеи (общая сонная артерия и яремная вена), хотя и располагались на дне раны, повреждены не были. Передняя поверхность щитовидной железы некротизирована, в связи с чем произведена ее частичная резекция. Хирургическая обработка ожоговой раны на шее закончена наложением глухого шва. Через месяц произведена трепанация наружной пластинки лобной кости. Через полтора месяца вся омертвевшая костная ткань передней стенки лобных пазух отторглась, и рана покрылась сплошным слоем грануляций. Через семь месяцев с момента травмы после выскабливания грануляций и слизистой лобных пазух рана закрыта с помощью итальянского лоскута, выкроенного на плече. Еще через 27 дней осуществлен второй этап итальянской пластики. Выписан в хорошем состоянии.

Пример 6.11. Больной М., 28 лет, поступил в клинику с ампутационными культями обоих плеч через пять месяцев после электроожога. В момент поступления общее состояние пострадавшего было вполне удовлетворительным.

Местно: на передневноутренних поверхностях культей обоих плеч гранулирующие раны размером справа 20×5 см и слева 18×6 см, дном которых являются обнаженные омертвевшие участки плечевых

костей. На рентгенограммах видны демаркационные линии между пораженными и здоровыми участками костей.

Благодаря своевременно принятым мерам удалось предотвратить реампутацию и сохранить длину культи. Через 3,5 месяца после поступления в клинику выписан по выздоровлению.

Пример 6.12. Электрик К., 26 лет, поступил в клинику с электроожогами головы, правого предплечья и III (среднего) пальца левой кисти через 3,5 месяца после травмы. Общее состояние удовлетворительное.

Местно: в правой затылочно-теменной области рана размером 6×6 см, дном которой является омертвевшая кость. В нижней трети правого предплечья на участке 6 см обнажена омертвевшая локтевая кость. На тыле основной фаланги пораженного пальца во всю ее длину — гранулирующая рана, на дне которой видна омертвевшая кость.

Рентгенограмма определила в нижней трети локтевой кости поражения длиной 6,5 см и четкую демаркационную линию между здоровыми и омертвевшими костными тканями.

Через две недели после поступления К. в клинику омертвевшие участки костей удалены.

Спустя 140 дней после электротравмы К. выписан в удовлетворительном состоянии, но со значительной потерей трудоспособности.

Другие наблюдения показали, что последствия электротравмы в ряде случаев проявляются спустя много лет с момента происшествия. У одного пострадавшего они обнаружались через 31 год (!) специфическими невротическими реакциями, проявившимися даже в области рубцов.

Приведенные примеры расширяют комплекс доказательств того, насколько велика роль нервной системы, и прежде всего центральной нервной системы, в исходе поражения. У лиц, побывавших в электрической цепи, возникают в процессе лечения неожиданные кровотечения, не наблюдаемые при обычных травматических поражениях. Приведем выводы, которые делает А. Н. Орлов с соавторами [53]:

«По данным Ленинградского научно-исследовательского института протезирования (М. А. Саркисов, С. А. Регентов, 1974), инвалиды с ампутацией рук после электротравмы составляют около 11 % протезируемых. С 1960 по 1982 г. в институте лечилось 119 инвалидов после электротравмы верхних конечностей. Контингент больных чрезвычайно тяжел: у 109 были произведены двусторонние ампутации на симметричных уровнях (у 91 — в верхней трети плеча, у 5 — вычленение в плечевом суставе, у 13 — ампутация в средней или нижней трети плеча).

Инвалиды, перенесшие электротравму и подлежащие протезированию, отличаются рядом специфических особенностей общего и местного порядка от аналогичных по тяже-

сти инвалидов, но подвергшихся ампутациям после других травм».

Сопоставление данных, характеризующих процесс лечения и исходы поражения электрическим током, с данными анализа электротравм со смертельным исходом и многочисленными опытами, проведенными многими зарубежными и отечественными учеными, позволяет сделать некоторые обобщения, изложенные в следующем параграфе.

6.4. Особенности механизма поражения человека электрическим током

Выявить и сформулировать механизм электротравмы не легко, ибо пределы, в которых находятся значения напряжения, тока, времени и других параметров, характеризующих электрическую цепь через тело человека или животного, весьма широки даже при одном и том же исходе поражения. Многочисленные опыты на животных не устранили противоречий между их результатами и результатами инструментального анализа электротравм. К тому же в процессе лечения электротравм выявилось множество специфических особенностей в реакциях человека в период реабилитации.

Электрическое сопротивление биообъекта. Сопоставление всех данных изучения электротравмы расширило представления о действии тока на живой организм, дало немало бесценных сведений об электрических параметрах биообъекта, прежде всего об его электрическом сопротивлении, не имеющем никаких аналогов во всем комплексе неживой природы. Электрическая проводимость живого объекта подчинена значительно более сложным физическим законам, чем электронная, электронно-дырочная и ионная проводимости неживого объекта, ибо проявляется в макроявлениях на основе весьма незначительных изменений, происходящих на атомно-молекулярном уровне. Следовательно, сколько-нибудь научно обоснованного ответа на вопрос: «Каков механизм действия электрического тока на человека?» все многоплановые и разносторонние исследования до сих пор еще не дали. Но, во всяком случае, уже установлено, что известные законы электротехники могут применяться к человеку лишь с большими оговорками и что моделировать электрическое сопротивление его тела простым активным сопротивлением, как делали и делают даже по сей день за рубежом и у нас такие опытные исследователи, как Х. Фрайбергер, Ц. Дальзиель, Дж. Купфер, П. Осипка, П. А. Долин, Р. Н. Карякин, С. П. Власов и др., нет достаточных оснований.

Электроожоги. Полезно перед формулировкой механизма действия электрического тока хотя бы кратко сказать об особенностях электроожогов, когда пострадавший одновременно подвергается двум травмирующим воздействиям — термическому и электрическому. Рассмотрение в предыдущем параграфе процесса лечения электроожогов убедительно показало, что электроожоги излечиваются значительно труднее и медленнее обычных термических, сопровождаются внезапно возникающими кровотечениями, омертвением отдельных участков тела, хотя температура пламени, источником которого являлась электрическая дуга, во многих случаях была ниже, чем при обычных термических ожогах.

Чем характеризуется пламя электрической дуги? Прежде всего — значительно большей плотностью заряженных частиц. Следовательно, при электротравме на живую ткань действуют как энергия теплового излучения (обычное термическое воздействие), так и энергия электрического поля (тока), причем последняя воздействует в первую очередь через чувствительные к току зоны — ныне мы вправе назвать их акупунктурными зонами; они непосредственно связаны электрорецепторами с центральной нервной системой.

Автору книги вспоминается разговор с крупным ученым-медиком, профессором, заведующим ожоговым отделением одной из ведущих клиник Ленинграда. В курируемую им клинику поступил человек, коснувшийся рукой шины, находившейся под напряжением 10 кВ. Возникшей дугой ему были причинены серьезные ожоги руки и обеих ног. На мое замечание, что этот больной нуждается в особом лечении, профессор-«ожоговик» ответил: «К нам поступил человек с ожогами, а ожоги мы умеем лечить».

После ампутации руки и обеих ног и достаточно длительного лечения все три культы стали заживать, и пострадавшего уже готовили к выписке для протезирования. Общее состояние его было удовлетворительным. С помощью приспособления он мог даже передвигаться в кресле. Решалась и проблема будущего трудоустройства, к чему больной относился положительно. Внезапно наступила смерть.

Вскрытие продолжалось несколько часов. Никаких явных причин гибели установить не удалось. Объяснить это, надо полагать, можно тем, что сколько-нибудь серьезного исследования состояния клеток центральной нервной системы произведено не было. Диагноз гласил: «Сердечная недостаточность, вызванная, по-видимому, электротравмой». Этот пример еще раз убедительно показывает, что при электротравме прежде всего поражается весь организм в целом, особенно

если фактор внимания не оказал своего спасительного «тормозящего» действия (см. § 6.2).

Локальные поражения, в том числе даже самые тяжелые, как в данном случае, являются следствием тяжести поражения центральной нервной системы. Вот почему пострадавшие от электрического тока нуждаются в специализированном лечении под обязательным наблюдением невропатолога. Когда такое специализированное лечение проводится, оно, как правило, приводит к успеху.

Акупунктурные зоны. Настало время подробнее остановиться на роли акупунктурных зон в исходе электротравмы. Еще в 1936 г. автор этой книги впервые обратил внимание на то, что электротравма со смертельным или очень тяжелым исходом возникает лишь тогда, когда в электрическую цепь через человека включаются определенные участки его тела [39]. Накопив за время, прошедшее после этой публикации, большой массив данных по результатам инструментальных исследований электротравмы, автор смог уже с большей долей уверенности заявить о наличии у человека участков тела, особенно уязвимых к току. При этом число «опасных» участков тела, названных «чувствительными к току зонами», увеличилось, а локализация их была подтверждена в результате изучения электрического сопротивления тела человека.

Еще И. М. Сеченов, взявшись за изучение электрического сопротивления тканей и электрической биоактивности, особое внимание уделил коже. Благодаря его исследованиям и исследованиям других крупнейших физиологов, а затем и биофизиков кожное сопротивление, особенно электроэпидермальное (сопротивление верхнего слоя кожи — эпидермиса), становится объектом тщательного клинического изучения. Различие сопротивлений отдельных участков кожи неоднократно отмечалось в литературе (И. Р. Тарханов и др.). Эти исследования, интересные в теоретическом и клинико-диагностическом отношении, побудили Н. Б. Познанскую заняться выявлением топографического распределения численных значений электрического сопротивления тела человека. Результаты проведенного ею изучения показали, что особого внимания заслуживают не столько численные значения электрического сопротивления различных участков кожи, сколько их соотношение [56]. Ей удалось установить эти относительные величины и определить сопротивление контрольного участка кожи. Таким участком, по мнению Н. Б. Познанской, является треть вентральной поверхности бедра, характеризующаяся стабильным электрическим сопротивлением, не имеющая потовых желез и, как правило, защищенная одеждой. Элек-

трическое сопротивление этого участка было принято за 100 %.

Относительно этого участка стало оцениваться электрическое сопротивление всех остальных участков тела человека или, как иногда пишут, «петель тока». Появился термин «топографический коэффициент электрического сопротивления». Значения его даже у одного человека находятся в довольно широких пределах и зависят от состояния субъекта, от окружающей среды, от времени года и времени суток. В то же время соотношения этого коэффициента у различных людей сохраняются всегда с точностью до 15—20 % и это важно, так как делают изменения электроэпидермального сопротивления простым и информативным диагностическим признаком. Б. М. Ворошилов многое сделал и делает для широкого внедрения этого показателя в практику.

Анализируя результаты своих исследований, Н. Б. Познанская предложила численные значения топографического коэффициента электрического сопротивления, показанные на рис. 6.1. На нем же приведена схема опосредованного воздействия электрического тока на человека. Как видно из схемы, электрическая цепь, возникшая через чувствительные к току зоны на теле, опосредует свое действие на сердечную мышцу или на органы дыхания через центральную нервную систему, что приводит в ряде случаев к смертельному исходу. Заметим, что в то время, когда делались эти выводы, акупунктура (иглоукалывание) еще не получила в СССР заметного распространения как метод диагностики и лечения.

Известный специалист в области электробезопасности Дж. Купфер в 70-х годах провел ряд исследований, связанных с определением значений тока при образовании электрической цепи через различные участки тела [103]. Он подтвердил, что эти значения весьма различны. За эталонное сопротивление (базу для сравнений) Дж. Купфер посчитал возможным принять, как это видно из рис. 6.2, электрическое сопротивление между ладонью и ступней. Почти двукратные колебания значений топографического коэффициента для разных вариантов контакта тела с «электродами» в электрической цепи, равно как и связь между минимальным электрическим сопротивлением и исходом воздействия электрического тока, им, к сожалению, не рассматриваются, хотя их можно отчетливо проследить. Работы Дж. Купфера показывают полезность совместной оценки данных экспериментальных наблюдений и результатов анализа действия электрического тока при электротравме, особенно с учетом возможного возникновения электрической цепи через акупунктурные точки.

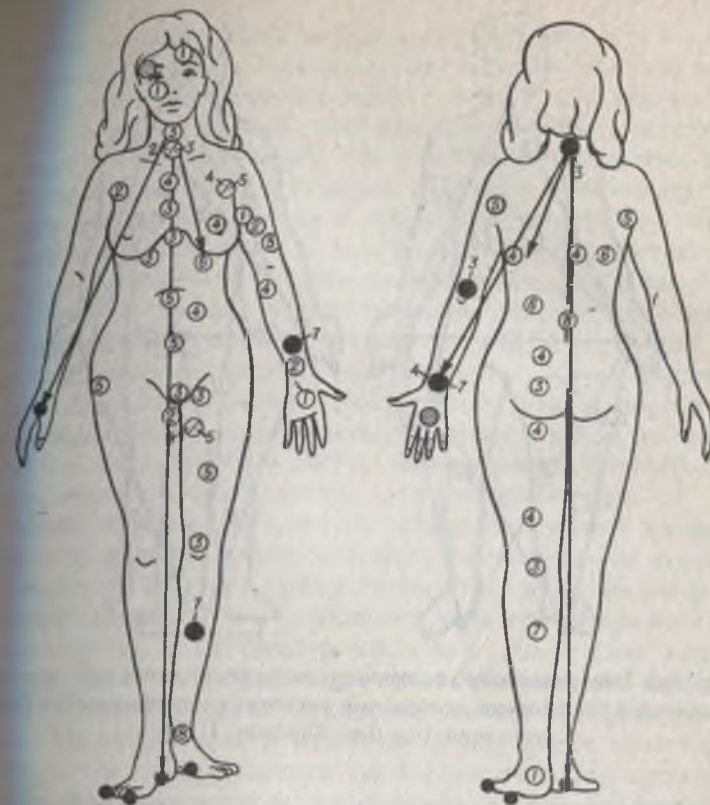


Рис. 6.1. Схема поражения через точки на теле человека, чувствительные к току, и их топографическое распределение (по Н. Б. Познанской с корректировкой В. Е. Манойлова)

Акупунктура как метод лечения пришла к нам из древности. Ее преимущество перед медикаментозным методом заключается, в частности, в том, что она не оказывает никакого кумулирующего (накопительного) действия.

Опубликованные в конце 50-х и в начале 60-х годов работы одного из основоположников отечественной акупунктуры В. Г. Вогралика [13] способствовали созданию во многих городах Советского Союза центров иглотерапии и привлекли к этому эффективному методу лечения внимание не только медиков, но и лиц, занимающихся выяснением механизма действия электрического тока. Оказалось, что «чувствительные к току зоны» совмещены с акупунктурными точками и протекание через некоторые из них тока небольшого значения оказывает терапевтическое действие. Об этом обстоятельстве

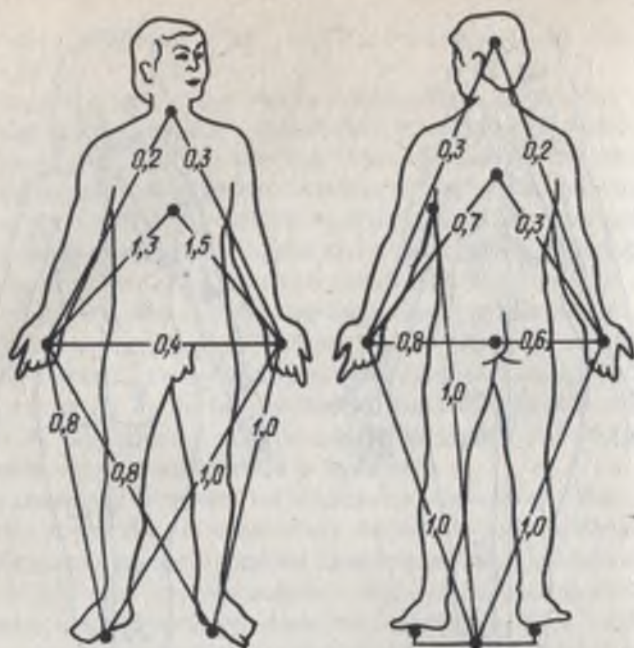


Рис. 6.2. Распределение электрического сопротивления участков тела человека с численными значениями расчетных коэффициентов сопротивления (по Дж. Кулферу [104])

но написано в монографии Ф. Г. Портнова [58]. В ней приведены полученные с помощью электронного микроскопа фотографии акупунктурных точек, в том числе и тех, через которые возникала электрическая цепь. Вокруг акупунктурных точек, вблизи сосудов, обладающих большой иннервацией (связью с центральной нервной системой при помощи нервов), обнаружены небольшие группы «тучных клеток». Отечественные и зарубежные ученые придают большое значение этим клеткам, как регуляторам гомеостаза (постоянного основного жизнеопределяющего состояния человека). Тучные клетки отличаются быстротой реакции на изменения внутренней и внешней среды, различной регуляторной восприимчивостью, ибо они реагируют на механические, химические и электрические раздражители. Они легко ранимы. Изменение обменных процессов в них благодаря иннервации отражается на организме в целом.

Множество тучных клеток можно рассматривать как своеобразную систему автоматического регулирования человека. Небольшое раздражающее действие положительно влияет на

организм, укрепляя равновесное состояние всех его жизнеопределяющих систем. Сильное раздражающее действие, особенно приложенное неожиданно (система регулирования к нему не подготовлена), нарушает равновесное состояние жизнеопределяющих систем, что и приводит к тяжелым последствиям для всего организма. К таким раздражителям следует отнести электрический ток, точнее, количество электроэнергии, поглощенной в зоне расположения акупунктурной точки и в самой точке. Электрическая цепь, возникающая в промежутке между акупунктурными точками, встречает своеобразное буферное сопротивление, которое уменьшает во многих случаях поглощение электроэнергии. Акупунктурные точки обладают сложной, комплексной проводимостью — электронно-ионной и электронно-дырочной; в целом их электрическое сопротивление всегда меньше электрического сопротивления зон, лежащих вне акупунктурных точек.

Таким образом, акупунктура объединяет, делает единым в своем проявлении живой организм. Это, конечно, не исключает вредного действия электрического тока и других раздражителей внешней среды на человека, если эти раздражители приложены не к акупунктурным зонам. Да и сама связь акупунктурных точек организма, неоднозначна, она своеобразно специализирована. Отдельные ткани, акупунктурные точки, расположенные в клетчатке кожи, имеют непосредственную или опосредованную связь с тем или иным органом. Это явление используется в электропунктурной рефлексотерапии и иглоукалывающей терапии, насчитывающей многовековую историю. Иглоукалывание (механическое воздействие на акупунктурные точки) — единственный метод лечения, имеющий подобную длительную историю.

Акупунктурные зоны привлекли внимание сотрудников Научно-исследовательского института медико-биологических проблем АМН СССР, где была создана группа для изучения этого биофизического феномена. Под руководством кандидата физико-математических наук Т. Я. Рябовой в короткие сроки были проведены интереснейшие биоэлектрические исследования акупунктурных зон, результаты которых обогатили представления о механизме электротравм и внесли существенный вклад в понимание, что такое «живое» и что такое «неживое».

На основе каких явлений имеет место положительное и отрицательное действие на организм процессов, возникающих в акупунктурных точках? Допустимо предположить суперпозицию электрического тока и жизнеопределяющих биоэлектрических или электрохимических явлений на клеточно-

мембранном уровне. В разгадку этих явлений немалый вклад вносит наука об изучении действия электрического тока на человека. Уровень наших знаний этой проблемы позволяет сделать наиболее вероятное определение механизма действия электрического тока. Однако целесообразно привести еще одну группу доказательств специфики его действия.

Роль различных раздражителей. Еще в 30-х годах отечественные ученые Ю. С. Сергеева, Л. Б. Минор, Ф. М. Лисица, Х. С. Ривлина и другие выяснили, что большие изменения электрического сопротивления участка тела человека между двумя наложенными на него электродами зависят от состояния нервной системы. Подробно этот вопрос освещен в § 7.1 и 7.2 третьего издания настоящей книги. Г. Кертис обнаружил изменения емкостной составляющей полного электрического сопротивления при распространении по нерву первого импульса. В. Кервран утверждает, что лица с симпатикотонической вегетативной нервной системой обладают значительно меньшим электрическим сопротивлением, чем лица с ваготонической вегетативной конструкцией. Различие по активной и емкостной составляющим сопротивления — более чем десятикратное. В эксперименте, проведенном при сопоставимых значениях индуктивного и емкостного сопротивлений, он выявил, что в первом случае сопротивление составило 2 кОм, при емкости 1,2 мкФ, во втором — соответственно 16 кОм при 0,15 мкФ.

Крайне нужным в диагностике нервных заболеваний является открытие психогальванического эффекта, который заключается в возникновении колебания электрического сопротивления между двумя электродами под влиянием эмоционального состояния и больших раздражителей.

Изменения электрического сопротивления под влиянием внешних раздражителей будут показаны на рис. 8.6. Здесь же укажем, следуя полученным нами кривым, что изменение электрического сопротивления, возникающее рефлекторно, сохраняется длительное время. Исходное значение сопротивления восстанавливается не ранее чем после десяти-пятнадцатикратного воздействия.

С. Коль и Г. Кертис подтвердили, что электрическое сопротивление резко уменьшается при различных физических раздражителях. Подчеркнем еще раз: изменение электрического сопротивления обусловлено главным образом биофизическими и биохимическими факторами и в меньшей степени физико-химическими.

Последнее подтверждается обстоятельными исследованиями И. Н. Сыромятниковой и ее сотрудников, изучавших

энергозатраты человека при теплообмене. Одной из составляющих теплообмена является испарение влаги. Исследования, проведенные на велоэргометре при различных дозированных нагрузках, показали, что с увеличением нагрузки суммарная теплопродукция растет. Если при «вело-нагрузке» включить светильник или подать звуковой сигнал, то испарение влаги резко возрастет. Это дает иное толкование кожно-гальваническому эффекту, несомненно, влияющему на исход электротравмы. Объяснение — в уменьшении подэлектродного сопротивления вследствие увлажнения кожи. Последнее следует учитывать при отборе лиц электропрофессий на работы, связанные с эксплуатацией электрооборудования, при оценке их энергоресурса и, конечно, при изучении биофизики электротравм.

Итоговая формулировка. Попытаемся, основываясь на изложенном, сформулировать, в чем заключается действие электрического тока.

Электрический ток (с учетом всех основных параметров, характеризующих его) является сложнейшим раздражителем тканей и органов. Это раздражение бывает первичным (непосредственным) и вторичным (опосредованным через нервную систему). Ток возбуждает прежде всего нервные окончания — внешние рецепторы. Он сужает их, нарушая при этом нормальную систему кровоснабжения и вызывая сокращение мускулатуры, которое может привести к остановке дыхания либо непосредственно, либо в результате спазмов коронарных сосудов головного мозга. Эти явления сопровождаются резким изменением кровяного давления, произвольным мочеиспусканием, нарушением работы эпителиального, слухового и других анализаторов. Нарушается равновесная связь жизнеопределяющих систем человека с окружающей средой. Действие электрического тока может приводить к кратковременному нарушению деятельности организма и его органов, но может проявляться и длительно. Человек, перенесший электротравму (даже легкую), — тяжелый больной, требующий длительного медицинского контроля. Вот почему так важны мероприятия по электробезопасности, предотвращающие саму возможность возникновения электротравм.

6.5. Тепловое и электрохимическое действие электрического тока

Поскольку электроожоги были достаточно подробно описаны ранее, не будем здесь касаться их, а сосредоточим свое внимание на некоторых, пока еще мало изученных воздей-

ствиях электрического тока на тело человека. Мы имеем в виду электродинамическое, биоэлектрoхимическое и тепловое (не связанное непосредственно с ожогами дугой) воздействия. Эти воздействия сравнительно немногочисленны, чем только и можно объяснить, что электропатологами и биофизиками они крайне мало изучены. В нашей книге делается едва ли не первая попытка уделить им внимание.

Электродинамическое действие электрического тока проявляется в возникновении при электротравмах рваных ран и вывихов рук или ног, зачастую остающихся не только не описанными, но даже не установленными. Хотя электродинамическое действие проявляется чаще всего локально — при взаимодействии между собой отдельных участков мышечной ткани, но оно может отразиться и на процессах, происходящих в системе кровообращения.

К этой категории действия электрического тока следует отнести имеющие определенную специфику (поэтому есть основания назвать их биоэлектрoхимическими) электрoхимические проявления. Они выражаются в осложнениях, сопутствующих процессу лечения, и определяют ту специфику процесса лечения, которую требует для себя, по существу, каждая электротравма, сопровождающаяся потерей сознания, даже если какие-либо электрометки на теле пострадавшего и отсутствуют. Еще раз следует указать на необходимость комплексного медицинского наблюдения за пострадавшими от электричества. Одним из отдаленных проявлений перенесенной электротравмы служат неожиданные кровотечения, возникающие спонтанно тогда, когда показателей для них как будто не имеется.

В литературе по электропатологии и электробезопасности неоднократно приводилось разделение путей тока через тело человека на «опасные» и «менее опасные». Предыдущим изложением установлены возможные исходы электротравм. Рассмотрена и роль акупунктурных зон в развитии поражения. Вследствие этого упомянутое подразделение путей тока на «опасные» и «менее опасные» должно получить новую интерпретацию, в пользу чего свидетельствует и рис. 6.2, приводимый во многих источниках со ссылкой на автора книги. Это поможет объяснить многие непредвиденные осложнения в процессе лечения электротравм.

Наиболее удачно и наглядно влияние плотности тока (путей тока) показал в своей работе Дж. Купфер (рис. 6.3). Правда, распределение плотности тока по телу человека он не увязывает с влиянием центральной нервной системы. Подтверждением этого служит рис. 6.4, которым Дж. Купфер, по

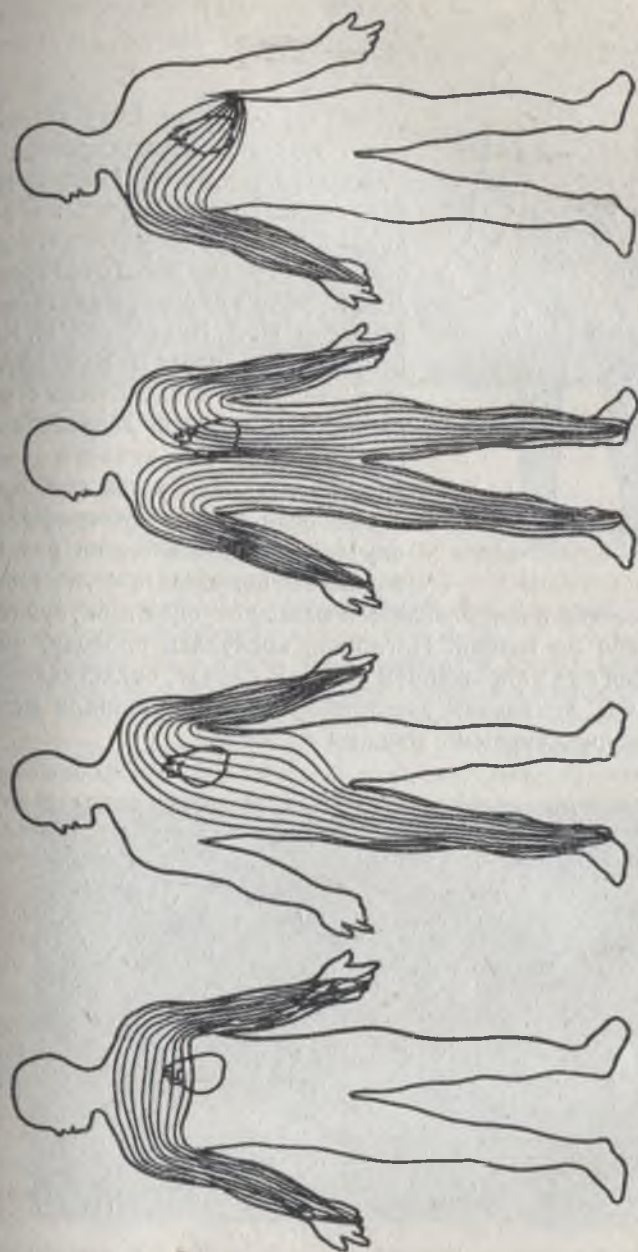


Рис. 6.3. Распределение плотности тока в зависимости от места возникновения электрической цепи через тело человека



Рис. 6.4. Распределение плотности тока, не прошедшего через область сердечной мышцы и не вызывающего, по мнению Дж. Купфера, смертельного поражения

существу, отрицает саму возможность тяжелой электротравмы от малого напряжения. Между тем, как подчеркивалось уже не раз, анализ электротравматизма показывает, что это не так. Точки зрения Дж. Купфера придерживались в прошлом Н. А. Вигдорчик, С. Кёппен, Ц. Дальзиель и ряд других отечественных и зарубежных ученых. Убедительным доказательством их неправоты и правоты автора настоящей книги являются представленные здесь фотографии. В случае, изображенном на рис. 6.5, женщина погибла при локальной

электрической цепи, возникшей между ступней и акупунктурной точкой на голени. Погибшая коснулась провода, находившегося под напряжением 220 В. В случае, представленном на рис. 6.6, локальная электрическая цепь возникла между двумя акупунктурными точками на лице.



Рис. 6.5. Поражение со смертельным исходом при возникновении электрической цепи между ступней и голенью одной и той же ноги (имитация)



Рис. 6.6. Поражение через уязвимые к току участки лица

Пример 6.13. Электротравма произошла на судостроительном заводе в январе 1972 г. Пострадавший Л., электромонтер четвертого разряда, ремонтировал включающее устройство напряжением 380 В мощного гидравлического пресса. Надобность в ремонте возникла из-за короткого замыкания в этом устройстве. Л. открыл дверцы электрического щита пресса и с соблюдением правил электробезопасности вытащил оттуда три предохранительные пластины. Однако верхние клеммы электрощита оказались под напряжением. Предупредив об этом помогавшего ему монтера, Л. продолжил работу по устранению последствий короткого замыкания. Вопреки обычно свойственной ему осторожности, подчеркнутой его помощником при разборе дела, он тыльной стороной кисти коснулся губок рубильника, находившегося под напряжением. Несмотря на немедленно принятые меры (искусственное дыхание прямо в рот пострадавшему, массаж в области сердца), спасти Л. не удалось.

Пример характерен тем, что поражение со смертельным исходом произошло при несомненном наличии фактора внимания. Электроток на руке обнаружить не удалось. Вскрытие показало асфиксию, вызванную нарушением работы органов дыхания.

Пример 6.14. В одном из пригородов крупного промышленного города в сентябре 1973 г. подключали к сети только что построенную дачу. Электромонтер был уверен, что напряжение снято со всех трех фаз линии электропередачи 380 В. Однако нулевой провод оказался подключенным к подстанции. Уже завершая работу, электромонтер тыльной стороной кисти коснулся нулевого провода. Касание, как показали стоявшие внизу члены бригады, было мгновенным, так как пострадавший резко отдернул руку и повис на предохранительном ремне. Несмотря на квалифицированную доврачебную помощь, спасти пострадавшего не удалось. Напряжение на нулевом проводе, появившееся вследствие несимметрии нагрузки в сети 380/220 В, не



Рис. 6.7. Поражение через уязвимые к току участки руки

превышало 15—20 В. На тыльной стороне кисти, в районе большого пальца, обнаружена метка типа осинового укуса с небольшим покраснением (рис. 6.7) Вскрытие обнаружило асфиксию.

В обоих случаях, описанных в примерах 6.13 и 6.14, простые нитяные перчатки без пальцев могли бы спасти людей.

В случае, представленном на рис. 6.6, монтер находился в исправных диэлектрических галошах и цепь через ноги не могла возникнуть. В случае, описанном в примере 6.14, локальная электрическая цепь возникла через акупунктурную зону на руке.

Наряду с этим известны примеры, когда электрическая цепь возникла не через акупунктурные точки и смертельный



Рис. 6.8. Вид пострадавшего через три недели после поражения током 7,8 А, 6,6 кВ

исход не наступил. В одном из таких случаев электротравма вызвала тяжелые последствия, потребовавшие длительного лечения, но пострадавший после лечения сохранил ограниченную трудоспособность. Тяжесть поражения видна на рис. 6.8.

Пример 6.15. Монтер голыми руками коснулся шины 6,6 кВ, значение тока и время его прохождения были определены по осциллограмме аварийного автоматического осциллографа, сработавшего в момент происшествия. Ток оказался равным 7,8 А, а время нахождения монтера в цепи составляло 2 с. Пострадавший остался жив, хотя и получил тяжелые ожоги.

А вот другой случай с тяжелыми последствиями (рис. 6.9), но не закончившийся смертельным исходом. Заметим, что электротравма произошла при напряжении 380/220 В и даже не сопровождалась дугой. Тяжесть исхода можно объяснить только биоэлектрохимическими явлениями на клеточном и молекулярном уровнях. Это пример, когда электротравма сопровождалась термическим воздействием непосредственно на жизненно важные системы человека. Пострадавший остался жив и после длительного, многолетнего лечения был выписан с ограниченной трудоспособностью. Дальнейшую судьбу его проследить не удалось, хотя, несомненно, здесь наряду с электротепловым имело место и электрохимическое поражение.

Параграф начат с утверждения, что определяющим в исходе электротравмы является поражение нервной системы. Добавим — на макро- и микроуровнях. Тепловое и биоэлектрохимическое воздействия влияют, по-видимому, на процесс реабилитации, и об этом надо помнить.



Рис. 6.9. Пострадавший в процессе лечения после возникновения электрической цепи через голову [53]

Но что же в конце концов обуславливает смертельный исход электротравмы — остановка сердечной мышцы или прекращение дыхания? Пояснения по этому вопросу будут сделаны в следующем параграфе.

6.6. Первично поражаемая система — кровообращение или дыхание?

Установление системы, с которой начинает развиваться поражение при летальной электротравме, имеет не только медикобиологическое значение. Узнав, с чего начинается (или, скажем осторожнее, с чего чаще всего начинается) поражение, мы сделаем эффективнее борьбу за сохранение здоровья пострадавшего.

Поясним сказанное примером. Острое нарушение сердечной деятельности у человека, управляющего производственным агрегатом и пораженного электрическим током, грозит тяжелыми последствиями, причем не только для пострадавшего. Автоматический перевод управления на другое лицо или автоматическая сигнализация о происшествии могут локализовать развитие возможной катастрофы. А автоматический ввод в действие средств реанимации (например, электрическая стимуляция сердца) может дать спасительный для пострадавшего выигрыш времени.

Но прежде чем разрабатывать конкретные меры по предотвращению несчастий, необходимо знать, как эти несчастья возникают и развиваются и чем они заканчиваются. Действительно ли первым поражается сердце? Или же прежде всего выходят из строя органы дыхания? А может быть, беда подстерегает человека в результате поражения каких-либо других систем?

К истории вопроса. Скажем сразу, что однозначных ответов на поставленные вопросы до сих пор еще нет. Вот почему целесообразно дать хотя бы краткий обзор взглядов, высказанных на интересующую нас тему за те десятилетия, в течение которых ведется борьба с электроопасностью.

Многочисленные случаи оживления пострадавших с помощью одного лишь ручного искусственного дыхания, а также некоторые патологоанатомические данные заставляли прежде полагать, что дыхательные нарушения первичны. На этой точке зрения стояли такие исследователи, как Г. Дарсонваль, С. Еллинек и Дж. Холштейн.

Но мнение о первичном поражении органов дыхания при закончившихся летально электротравмах, на первом этапе изучения вопроса казавшееся неоспоримым, затем было по-

колеблено. На VII Международном конгрессе по промышленному травматизму (1935 г.) М. Стассен предложил делить пораженных электрическим током на «синих» (с первичной остановкой дыхания) и «красных» (с первичной остановкой сердца). Возможность у человека одновременного выключения обеих систем долгое время рассматривалась скептически, в лучшем случае — с осторожностью, хотя уже в 30-х годах в экспериментах, проведенных И. Р. Петровым на собаках, упомянутая альтернатива (дыхание или кровообращение?) нашла свое решение в том смысле, что смерть может наступить либо от первичного прекращения кровообращения, либо от первичной остановки дыхания, либо от одновременно-го прекращения работы обеих систем [75].

В одной из работ И. Р. Петрова даны полученные в экспериментах на животных следующие усредненные соотношения: при поражениях, не приведших к смерти, сердце реагировало в 2 % случаев раньше дыхания, в 2 % — позже его, а в 96 % — реакции со стороны кровообращения и дыхания наступали одновременно. При поражениях, закончившихся летально, сердце в 44 % случаев останавливалось раньше дыхания, в 44 % — позже его, а в 12 % случаев остановка происходила одновременно.

В дальнейшем, по мере развития исследований по экспериментальной электротравме стали накапливаться данные о том, что опасные электрические поражения начинаются с фибрилляции *, заканчивающейся необратимой остановкой сердца. Эксперименты В. А. Неговского и руководимого им коллектива были в этом плане достаточно убедительными. Их данные не противоречили результатам опытов Ц. Дальзиеля, Л. Ферриса и др. Попутно заметим, что вследствие этого оказалась отодвинутой на второй план гипотеза о так называемой мнимой смерти как глубокой фазе электрического шока. При мнимой смерти организм еще живет, но функционирует замедленно и человек кажется мертвым.

* Фибрилляцией сердца называется такое его состояние, когда оно перестает сокращаться как единое целое, а происходят отдельные некоординированные подергивания многочисленных волокон сердечной мышцы. Число таких сокращений, регистрируемое на электрокардиографе, достигает сотен в минуту (Л. И. Фогельсон). Естественно, что в отношении передвижения крови такое фибриллирующее сердце равнозначно сердцу останавливающемуся: насосная функция органа прекращается и, если не осуществить мероприятий, именуемых дефибрилляцией, наступит моментальная смерть.

Итак, на втором этапе изучения вопроса все перечисленные авторы, а также и многие другие, экспериментировавшие на животных разных видов и в разных условиях, пришли к выводу, что электротравмы, закончившиеся летально, имеют в своей начальной стадии развития фибрилляцию. Этот взгляд согласовывался с наблюдениями за людьми, пораженными электрическим током.

Однако использование нейрогистологических и других современных методов оценки причин летальных исходов электротравм все чаще позволяло опытным судебно-медицинским экспертам и патологоанатомам диагностировать в качестве причины поражения «остановку дыхания». Подобные суждения находили подтверждение и в результатах расследования электротравм, возникших в сетях напряжением ниже 1000 В, и особенно в сетях малого напряжения (36 и 65 В). Действительно, ток через тело пострадавшего не мог в этих случаях превышать несколько миллиампер, а такой ток даже при непосредственном наложении электродов на сердечную мышцу вызвать фибрилляцию не способен.

Таким образом, на третьем этапе изучения вопроса доминирующее значение фибрилляции в исходе поражения было поставлено под сомнение. В этом отношении заслуживает внимания работа И. К. Мищенко [42], показавшего, что среднее значение полного минимального тока электрической цепи, вызывающего фибрилляцию, составляет около 250 мА для мужчин и около 220 мА для женщин. Эти значения не противоречат данным С. Кёппена [100]. Но если это так, то в сетях напряжением 220 В при однополюсном прикосновении (когда поражающим является фазное напряжение 127 В и ниже) смертельных поражений из-за первичной остановки сердца вообще быть не может. Ведь получить подобные токи при этих напряжениях невозможно даже при отсутствии сопротивлений, включенных в цепь последовательно с телом человека. К сожалению, интереснейшая работа И. К. Мищенко не вызвала соответствующей реакции сторонников фибрилляционного механизма.

Ограниченная ценность результатов при экспериментальных электротравмах. Позиции «фибрилляционистов» были существенно поколеблены и всесторонним анализом результатов, получаемых при экспериментальных электротравмах. В частности, неоспоримым представляется сомнение в возможности непосредственной экстраполяции экспериментальных данных на человека. Ведь утверждение о преобладании смерти от фибрилляции основано больше всего на экспериментах с собаками, характеристики же электрического

сопротивления у собаки и у человека существенно различны.

Действительно, у собаки электротравма в условиях, когда ток идет через передние и задние лапы, всегда приводит к смерти от фибрилляции *. Больше того, чтобы добиваться смерти собаки не от фибрилляции, надо применять совершенно неадекватное практике расположение электродов. Так, Г. Л. Любан воссоздал картину экспериментального электрического шока, расположив электроды на обоих ушах подопытного животного. М. Т. Туркменов воспроизвел модель мнимой смерти в еще более сложных условиях эксперимента [72]. Лишь в крайне редких случаях К. А. Ажибаев [3] наблюдал у собак при подаче тока по полной или косой петлям ** смерть без фибрилляции. Таким образом, вопрос о том, какой механизм смерти преобладает при несчастных случаях от электричества — фибрилляционный или дыхательный, сводится к вопросу о том, столь ли обязательно фибрилляция при электротравме человека, как она обязательна у собак или иных крупных животных в вышеуказанных условиях прохождения тока.

Некоторые экспериментаторы отмечают близкое сходство картин электротравмы у собак и кошек; считается даже, что такая же картина свойственна белым мышам при их моментальной гибели от электрического тока. Однако последний вывод опровергнут В. Я. Эскиным. Работая с белыми мышами, вообще широко используемыми в электропатологическом эксперименте ввиду возможности ставить на них массовые опыты с примерно уравненными переходными сопротивлениями, упомянутый автор установил на основе электрокардиографических исследований, что даже при полной петле у белых мышей моментальная смерть никогда не сопровождается фибрилляцией, а всегда обусловлена первичной остановкой дыхания. Это делает мышь очень удобным объектом для изучения дыхательных реакций при электротравме и совершенно непригодным объектом для изучения поражения по механизму «первичная остановка сердца». У таких животных, как мыши и крысы, фибрилляция либо не возникает вовсе, либо, возникнув, прекращается немедленно после разрыва электрической цепи.

* Дело не столько в разных значениях сопротивления, сколько в том, что сердце собаки самостоятельно не выходит из состояния фибрилляции (Н. Л. Гурвич), тогда как сердце человека (по мнению Л. И. Фогельсона) к этому способно.

** Полная петля: передние конечности — задние конечности; кося: левая передняя нога — правая задняя нога или наоборот.

В пользу первичного поражения дыхания свидетельствует и то, что человек, попавший под напряжение, даже при сохранении сознания не может позвать на помощь. Молчание гибнущего объясняется, по-видимому, ненормальным состоянием голосовой щели — ее спазмом. А. В. Гринберг, специально исследовавший этот вопрос, утверждает, что при электротравме голосовая щель зияет. Но М. Т. Туркменов, экспериментируя на животных, этого вывода не подтвердил. Последнее лишний раз указывает на то, насколько сложно и опасно результаты экспериментов с животными экстраполировать на человека.

Кардиоцикл и момент включения электрической цепи. Отмечая весомость аргументов, выдвигаемых учеными, которые первопричину летального исхода электротравмы видят в поражении дыхательной системы, мы не вправе сегодня отрицать и возможность прямого поражения сердца. Такая возможность неоспорима, особенно если учесть, что сердце реагирует даже на кратковременные электрические удары.

Замечено, что сердцу далеко не безразлично, на какую именно из фаз его деятельности пришлась электротравма. Эта деятельность циклична, причем полный цикл носит название кардиоцикла. Он может быть определен различными способами. Для этого используются биотоки, развиваемые сердцем во время его сокращения; их регистрация называется электрокардиографией. Нормальная электрокардиограмма показана на рис. 6.10. Дадим несколько пояснений. Зубец *P* отображает сокращение предсердий, зубцы *Q*, *R*, *S* и *T* — сокращение желудочков и поэтому называются желудочковым комплексом. Во время, соответствующее комплексу *Q—R—S—T*, сердечная мышца невозбудима. В состоянии, соответствующем зубцу *T* (конечная часть желудочкового комплекса), возбудимость уже частично восстанавливается. Доказано, что электрический ток наименее опасен для сердца



Рис. 6.10. Нормальная электрокардиограмма человека

в период *R* и что фибрилляция чаще всего возникает, если момент электротравмы совпадает с нарастающей частью зубца *T* [25, 94].

Опасность тяжелого исхода в результате необратимой фибрилляции реальна не только тогда, когда время протекания тока перекрывает время кардиоцикла, но и тогда, когда оно значительно меньше его. Рассмотрим механизм возникновения фибрилляции при очень коротких воздействиях в пределах одного кардиоцикла. С достижением определенного значения тока, протекающего через сердце, возникает преждевременное его возбуждение, называемое экстрасистолой. Чем больше значение тока, тем раньше в кардиоцикле возникает экстравозбуждение. По мере увеличения амплитуды тока, действующего на сердце, последнее отвечает на это возбуждение все раньше и раньше, в результате чего общая длительность кардиоцикла укорачивается. Соответственно возрастает темп сердечных сокращений. Наконец, амплитуда тока достигает такого значения, которое и вызывает фибрилляцию.

При общем токе в сети, измеряемом миллиамперами, фибрилляция возникает только в том случае, если удар током пришелся на нарастающую часть зубца *T*. Такие же удары током, приходящиеся на зубцы *P*, *Q*, *R* и *S*, т. е. возникающие в течение диастолы, фибрилляцию, как правило, не вызывают [33].

Современное состояние вопроса — спор не решен. Итак, спор о том, что является первичной реакцией человека на электрический ток — поражение системы дыхания или остановка сердца, не ослабевает. Одни из позднейших исследователей, вспоминая высказывания первых электропатологов, обращают внимание на то, что многие лица не погибали, хотя никаких мер по снятию фибрилляции у них не предпринималось, а производилось лишь самое элементарное искусственное дыхание. Это рассматривается крупным советским кардиологом Л. И. Фогельсоном как доказательство способности человеческого сердца спонтанно выходить из состояния фибрилляции. Его мнение разделяют многие отечественные и зарубежные ученые, сомневающиеся в возможности экстраполировать законы «собачьей фибрилляции» на человека и считающие, что угроза «человеческой фибрилляции» преувеличена.

Другие исследователи отрицают способность человеческого сердца спонтанно выходить из состояния фибрилляции. Такого мнения придерживается, в частности, Н. Л. Гурвич. Разделяют эту позицию и многие зарубежные авторы, такие,

как Лее, Л. Феррис с сотрудниками и др. Они утверждают, что тяжелые исходы при поражениях электрическим током являются результатом первичной фибрилляции желудочков в случае непосредственного воздействия тока на них. Смерть от электрического тока, резюмируют они,— всегда смерть сердечная. И напоминают старый постулат немецких медиков: «Смерть к человеку приходит из сердца».

Третьи, не отрицая опасности для человека, попавшего в электрическую цепь, первичного воздействия тока непосредственно на сердечную мышцу, полагают, что механизм смертельного поражения при электротравме заключается чаще всего в первичном нарушении системы дыхания, конечной же фазой процесса является остановка сердца.

Как ни противоречивы мнения представителей различных течений, в одном ученые согласны друг с другом: до тех пор, пока механизм смертельной электротравмы однозначно не расшифрован, рекомендации по доврачебной и врачебной помощи должны базироваться на возможности первичного поражения как дыхания, так и сердца.

Человек — саморегулирующаяся система. Разрешить на этих страницах столь затянувшийся спор о «синей» или «красной» природе смертельной электротравмы мы, естественно, не беремся. Но все же считаем нужным указать на известную условность самой постановки вопроса: «Что доминирует при смертельном поражении человека электрическим током — остановка кровообращения или прекращение дыхания?». Ведь системы дыхания и кровообращения являются в норме (подчеркиваем — в норме) единым функциональным блоком, замкнутой автоматической системой регулирования. Достаточно сослаться на то, что сердце получает стимулирующие его импульсы опосредованно через дыхательный центр, а последний, как и вся система дыхания в целом, может работать, выполняя свою сложнейшую функцию, только в условиях нормального кровоснабжения.

Когда же наступает поражение, вызванное возникновением электрической цепи через тело человека, и последнее поглощает значительное количество электрической энергии, то этот обычно четко действующий функциональный блок выходит из строя. При этом прежде всего нарушается система автоматического регулирования важнейшей из жизнеобеспечивающих систем — кровообращения. Мы сталкиваемся здесь со своеобразным порочным кругом: в каком бы из звеньев упомянутого единого функционального блока ни произошел разрыв, «замыкание» осуществляется обязательно на сердце. Прекращением сердцебиения заканчивается

процесс воздействия поражающих факторов — наступает смерть.

Автору книги, как инженеру, позволительна тут аналогия с энергосистемой, состоящей из десятков электростанций с сотнями генераторов и из тысяч километров высоковольтных линий электропередачи, раскинувших свою сеть по огромной территории. Вся эта сложнейшая система объединяется общим ритмом — частотой 50 Гц, т. е. 50 периодов в секунду. Если в одном из звеньев системы происходит серьезное повреждение, то оно больше всего сказывается на ближайшей станции, на ее генераторах. Число их оборотов может «сесть», частота уменьшится, и тогда станция выпадет из ритма, из синхронизма; рассыплется вся система, и снабжение электроэнергией потребителей прекратится.

Но возможен и другой исход — остальные электростанции системы автоматически, посредством сбалансированного регулирования дадут в сеть дополнительную энергию и тем помогут системе «залечить» повреждение и продолжить бесперебойное электроснабжение потребителей.

Подобно этому любая травма, нанесенная человеку, в том числе и электротравма, вызывает нарушение ритма физиологических процессов. Последние характеризуются строгой взаимосвязанностью во времени. В условиях нормальной жизнедеятельности некоторые из них синхронны, некоторые синфазны, некоторые находятся в противофазе или же процесс протекает с определенной последовательностью фаз. При этом органы и ткани, в которых происходят эти процессы, так же как и составные части энергосистемы, жестко взаиморегулируются.

«Вся саморегуляция, читаем мы у К. А. Ажибаева и др. [3], заключается в том, чтобы все эти соотношения были соблюдены (т. е. не было бы хаоса), причем в оптимальных для нормальной жизнедеятельности временных (добавим — амплитудных.— В. М.) соотношениях... Сердце является идеальным примером и того, что физиологические процессы ритмичны и строго сфазированы. Предсердие сокращается до желудочка (что обеспечивается задержкой проведения возбуждения в атриовентрикулярном узле). Если бы этого сдвига по фазе не существовало, то верхняя полови-

нарушение динамики кровообращения, которое носит название закупорки предсердия. В этом случае обычен тяжелый исход. Но возможно и другое нарушение ритма — фибрилляция (см. примечание на стр. 168), также влекущая за собой тяжелый исход. Этот исход может быть следствием поражения дыхательных или сосудосократительных центров, оказавшихся неподготовленными к поглощению электрической энергии и к захлестнувшей их «лавине возбуждения». Наконец, летальный исход может явиться следствием электрошокового состояния. Правда, существование электрической разновидности шока считается недоказанным, но нам представляется, что доводов в его пользу больше чем достаточно, особенно если в понятие электрошока включить и электрический удар.

Не будем перечислять других форм нарушения системы автоматического регулирования сердечной деятельности, поскольку это завело бы нас слишком далеко. Подчеркнем лишь, что сердце должно сокращаться как целое и обязательно в той последовательности и с теми фазовыми, временными и амплитудными характеристиками, которые обеспечивают четкость автоматического регулирования. В ином случае — выход из строя сердца, этого определяющего звена жизнедеятельности.

При возникновении электрической цепи через тело человека в его органах, тканях, системах происходит поглощение электрической энергии. Объем, характер и динамика поглощения обусловлены множеством взаимосвязанных причин. Имеет значение то, через какие участки тела возникла цепь (а она может возникнуть через любые участки тела); важно и то, как произошел ввод электрической энергии в тело, каковы электрические параметры цепи (ток, напряжение и т. д.). Все это вызывает нарушение тех или иных систем регулирования и объясняет, почему в одних случаях поражается прежде всего дыхание, в других — непосредственно сердце, в третьих — сосуды, в четвертых — нервы, обеспечивающие регулирование, и т. п. Но так или иначе, в конечном счете саморегулирование нарушается и сердце останавливается.

Из сказанного можно сделать вывод, весьма важный для формулирования задач электробезопасности: многообразие причин нарушения работы сердца показывает, что нет

процесс воздействия поражающих факторов — наступает смерть.

Автору книги, как инженеру, позволительна тут аналогия с энергосистемой, состоящей из десятков электростанций с сотнями генераторов и из тысяч километров высоковольтных линий электропередачи, раскинувших свою сеть по огромной территории. Вся эта сложнейшая система объединяется общим ритмом — частотой 50 Гц, т. е. 50 периодов в секунду. Если в одном из звеньев системы происходит серьезное повреждение, то оно больше всего сказывается на ближайшей станции, на ее генераторах. Число их оборотов может «сесть», частота уменьшится, и тогда станция выпадет из ритма, из синхронизма; рассыплется вся система, и снабжение электроэнергией потребителей прекратится.

Но возможен и другой исход — остальные электростанции системы автоматически, посредством сбалансированного регулирования дадут в сеть дополнительную энергию и тем помогут системе «залечить» повреждение и продолжить бесперебойное электроснабжение потребителей.

Подобно этому любая травма, нанесенная человеку, в том числе и электротравма, вызывает нарушение ритма физиологических процессов. Последние характеризуются строгой взаимосвязанностью во времени. В условиях нормальной жизнедеятельности некоторые из них синхронны, некоторые синфазны, некоторые находятся в противофазе или же процесс протекает с определенной последовательностью фаз. При этом органы и ткани, в которых происходят эти процессы, так же как и составные части энергосистемы, жестко взаимодействуют.

«Вся саморегуляция, читаем мы у К. А. Ажибаева и др. [3], заключается в том, чтобы все эти соотношения были соблюдены (т. е. не было бы хаоса), причем в оптимальных для нормальной жизнедеятельности временных (добавим — амплитудных.— В. М.) соотношениях... Сердце является идеальным примером и того, что физиологические процессы ритмичны и строго сфазированы. Предсердие сокращается до желудочка (что обеспечивается задержкой проведения возбуждения в атриовентрикулярном узле). Если бы этого сдвига по фазе не существовало, то верхняя половина не смогла бы перекачивать свое содержимое (подразумевается кровь.— В. М.) в нижнюю половину, а последняя не смогла продвигать его дальше (т. е. в сосудистую систему.— В. М.)».

Допустим, что нарушается ритм — предсердие и желудочек начинают сокращаться одновременно. Наступает тяжелое

нарушение динамики кровообращения, которое носит название закупорки предсердия. В этом случае обычен тяжелый исход. Но возможно и другое нарушение ритма — фибрилляция (см. примечание на стр. 168), также влекущая за собой тяжелый исход. Этот исход может быть следствием поражения дыхательных или сосудосократительных центров, оказавшихся неподготовленными к поглощению электрической энергии и к захлестнувшей их «лавине возбуждения». Наконец, летальный исход может явиться следствием электрошокового состояния. Правда, существование электрической разновидности шока считается недоказанным, но нам представляется, что доводов в его пользу больше чем достаточно, особенно если в понятие электрошока включить и электрический удар.

Не будем перечислять других форм нарушения системы автоматического регулирования сердечной деятельности, поскольку это завело бы нас слишком далеко. Подчеркнем лишь, что сердце должно сокращаться как целое и обязательно в той последовательности и с теми фазовыми, временными и амплитудными характеристиками, которые обеспечивают четкость автоматического регулирования. В ином случае — выход из строя сердца, этого определяющего звена жизнедеятельности.

При возникновении электрической цепи через тело человека в его органах, тканях, системах происходит поглощение электрической энергии. Объем, характер и динамика поглощения обусловлены множеством взаимосвязанных причин. Имеет значение то, через какие участки тела возникла цепь (а она может возникнуть через любые участки тела); важно и то, как произошел ввод электрической энергии в тело, каковы электрические параметры цепи (ток, напряжение и т. д.). Все это вызывает нарушение тех или иных систем регулирования и объясняет, почему в одних случаях поражается прежде всего дыхание, в других — непосредственно сердце, в третьих — сосуды, в четвертых — нервы, обеспечивающие регулирование, и т. п. Но так или иначе, в конечном счете саморегулирование нарушается и сердце останавливается.

Из сказанного можно сделать вывод, весьма важный для формулирования задач электробезопасности: многообразие причин нарушения работы сердца показывает, что нет и не может быть прямой линейной зависимости исхода поражения от параметров электрической цепи. Зависимости тут сложны: они определяются огромным числом факторов, находящихся к тому же во взаимосвязи и взаимообусловленности. Они подробно рассматриваются в следующей гла-

процесс воздействия поражающих факторов — наступает смерть.

Автору книги, как инженеру, позволительна тут аналогия с энергосистемой, состоящей из десятков электростанций с сотнями генераторов и из тысяч километров высоковольтных линий электропередачи, раскинувших свою сеть по огромной территории. Вся эта сложнейшая система объединяется общим ритмом — частотой 50 Гц, т. е. 50 периодов в секунду. Если в одном из звеньев системы происходит серьезное повреждение, то оно больше всего сказывается на ближайшей станции, на ее генераторах. Число их оборотов может «сесть», частота уменьшится, и тогда станция выпадет из ритма, из синхронизма; рассыплется вся система, и снабжение электроэнергией потребителей прекратится.

Но возможен и другой исход — остальные электростанции системы автоматически, посредством сбалансированного регулирования дадут в сеть дополнительную энергию и тем помогут системе «залечить» повреждение и продолжить бесперебойное электроснабжение потребителей.

Подобно этому любая травма, нанесенная человеку, в том числе и электротравма, вызывает нарушение ритма физиологических процессов. Последние характеризуются строгой взаимосвязанностью во времени. В условиях нормальной жизнедеятельности некоторые из них синхронны, некоторые синфазны, некоторые находятся в противофазе или же процесс протекает с определенной последовательностью фаз. При этом органы и ткани, в которых происходят эти процессы, так же как и составные части энергосистемы, жестко взаимодействуют.

«Вся саморегуляция, читаем мы у К. А. Ажибаева и др. [3], заключается в том, чтобы все эти соотношения были соблюдены (т. е. не было бы хаоса), причем в оптимальных для нормальной жизнедеятельности временных (добавим — амплитудных.— В. М.) соотношениях... Сердце является идеальным примером и того, что физиологические процессы ритмичны и строго сфазированы. Предсердие сокращается до желудочка (что обеспечивается задержкой проведения возбуждения в атриовентрикулярном узле). Если бы этого сдвига по фазе не существовало, то верхняя половина не смогла бы перекачивать свое содержимое (подразумевается кровь.— В. М.) в нижнюю половину, а последняя не смогла продвигать его дальше (т. е. в сосудистую систему.— В. М.)».

Допустим, что нарушается ритм — предсердие и желудочек начинают сокращаться одновременно. Наступает тяжелое

нарушение динамики кровообращения, которое носит название закупорки предсердия. В этом случае обычен тяжелый исход. Но возможно и другое нарушение ритма — фибрилляция (см. примечание на стр. 168), также влекущая за собой тяжелый исход. Этот исход может быть следствием поражения дыхательных или сосудосократительных центров, оказавшихся неподготовленными к поглощению электрической энергии и к захлестнувшей их «лавине возбуждения». Наконец, летальный исход может явиться следствием электрошокового состояния. Правда, существование электрической разновидности шока считается недоказанным, но нам представляется, что доводов в его пользу больше чем достаточно, особенно если в понятие электрошока включить и электрический удар.

Не будем перечислять других форм нарушения системы автоматического регулирования сердечной деятельности, поскольку это завело бы нас слишком далеко. Подчеркнем лишь, что сердце должно сокращаться как целое и обязательно в той последовательности и с теми фазовыми, временными и амплитудными характеристиками, которые обеспечивают четкость автоматического регулирования. В ином случае — выход из строя сердца, этого определяющего звена жизнедеятельности.

При возникновении электрической цепи через тело человека в его органах, тканях, системах происходит поглощение электрической энергии. Объем, характер и динамика поглощения обусловлены множеством взаимосвязанных причин. Имеет значение то, через какие участки тела возникла цепь (а она может возникнуть через любые участки тела); важно и то, как произошел ввод электрической энергии в тело, каковы электрические параметры цепи (ток, напряжение и т. д.). Все это вызывает нарушение тех или иных систем регулирования и объясняет, почему в одних случаях поражается прежде всего дыхание, в других — непосредственно сердце, в третьих — сосуды, в четвертых — нервы, обеспечивающие регулирование, и т. п. Но так или иначе, в конечном счете саморегулирование нарушается и сердце останавливается.

Из сказанного можно сделать вывод, весьма важный для формулирования задач электробезопасности: многообразие причин нарушения работы сердца показывает, что нет и не может быть прямой линейной зависимости исхода поражения от параметров электрической цепи. Зависимости тут сложны: они определяются огромным числом факторов, находящихся к тому же во взаимосвязи и взаимообусловленности. Они подробно рассматриваются в следующей гла-

ве. Здесь же заметим, что в только что высказанном суждении автор полностью солидаризируется с С. Еллинеком, идеи которого он развивает, и существенно расходится с мнением таких весьма авторитетных исследователей, как С. Кёппен, П. Осипка и Дж. Купфер, которые в своих трудах допускают, хотя и с оговорками, линейную зависимость исхода поражения от тока.

Выводы. По директивным документам, относящимся к электробезопасности, при расчете эффективности защитных мероприятий следует использовать значения фибрилляционного тока (ток, при котором наступает фибрилляция сердечной мышцы — несинхронные сокращения предсердий и желудочков) и неотпускающего тока (ток, при котором пострадавший не может разжать руку, зажимающую проводник). Значения этих токов неоднократно проверялись и в СССР и за рубежом главным образом на собаках, козах, свиньях. В достоверности результатов исследований сомнений нет. Значение неотпускающего тока устанавливалось на добровольцах и также не вызывало сомнений.

Анализ электротравм на основе моделирования электрической цепи (названный инструментальным) показывает, что значение поражающего тока, при котором наступает смертельный исход, много меньше значений поражающих токов, предусмотренных директивными документами и подтвержденных большим числом всесторонних наблюдений. В чем причина? В значительной степени ее объясняет более внимательный анализ экспериментов на животных. Особенно поучительны результаты экспериментов, проведенных в лаборатории электропатологии Академии наук Киргизской ССР (пока единственной такой лаборатории в мире), частично опубликованные в работе К. А. Ажибаева и находящие полное подтверждение в работах автора книги. Живой организм погибает или от фибрилляции сердечной мышцы (сердечная смерть), или от поражения системы управления дыханием (дыхательная смерть), или от шока, как правило, являющегося суперпозицией того и другого механизма поражения. Определить это крайне просто: при гибели живого организма по сердечному механизму кровь при вскрытии ало-красная, по механизму дыхания — кровь бурая и даже синяя. Оказалось, что вид смертельного поражения зависит от вида животного. У мелких животных (мыши, крысы, кролики и т. д.) смертельный исход обусловлен только поражениями дыхательного центра нервной системы. Вызвать смертельный исход по механизму фибрилляции не удалось у этих животных никому из исследователей и, наоборот, вызвать «дыхательную смерть»

у собак и свиней не удалось также ни одному исследователю.

В этой классификации большая заслуга принадлежит Г. Л. Френкелю, К. А. Ажибаеву и коллективу лаборатории электропатологии Академии наук Киргизской ССР. Именно эти сравнительные исследования, проведенные на колоссальном материале, позволяют сделать вывод: крупные животные погибают от фибрилляции, мелкие — от поражения дыхания.

А что же с человеком? Обратимся к материалам судебно-медицинской экспертизы за 25—30 лет, поистине многолетним. Что же оказывается? Человеку присущи все три механизма, и по этому признаку его жизнедеятельность принципиально отлична от жизнедеятельности любого вида животного. Вот цифры на 100 погибших: 7 случаев — поражение, вызванное фибрилляцией; 91 случай — поражение системы дыхания и в двух случаях четко установить причину гибели не удалось. Механизм дыхания преобладает при случайных, неожиданных для пострадавшего обстоятельствах и условиях несчастного случая.

Диапазон поражающих токов весьма широк. В частности, если электрическая цепь возникает через акупунктурные зоны, поражение происходит при очень маленьких токах, при «сердечной смерти» значение тока приближается к значениям, предусмотренным директивными документами в СССР и за рубежом.

Обратимся к дидактическому сравнению. Допустим, что скорость автомобиля сравнима с электрическим током. Но в этом случае никому не приходит, да и не придет в голову ограничивать ее до значения, при котором столкновение с человеком не вызовет серьезной травмы. Условия безопасности решаются организационными мероприятиями (светофоры на линиях передвижения автомобилей по мостовой, наличие надежных тормозных систем и т. д.). Здесь это очевидно и ясно. Почему же при оценке электробезопасности надо основываться на значении безопасного тока? Упоминалось, что полностью безопасный ток находится в пределах 1—2 мА. Рассчитать напряжение прикосновения или сопротивление заземления, используя крайне неопределенное значение электрического сопротивления тела человека, зависящего от множества причин, очень сложно. Обеспечение надежности изоляции электрооборудования — основное эффективное защитное мероприятие.

6.7. Состояние пораженного организма

Неоднократно замечено, что при полной идентичности поражающих факторов электрической цепи через тело человека исходы электротравм бывают весьма различными. Естественно, это связывается с состоянием здоровья человека, подвергшегося «электрической атаке».

Болезни человека, утяжеляющие исходы электротравм. Не будет, пожалуй, преувеличением сказать, что многие патологические (болезненные) состояния человека вызывают те или иные сдвиги в тепловой и биоэлектрохимической напряженности организма, приводят к изменениям ряда параметров его элементарных частиц и к прочим отклонениям на макро- и микроуровнях, причем все это либо непосредственно, либо опосредованно (через нервную систему) сказывается на исходе электротравмы.

Например, утомление, возникающее к концу рабочего дня, снижая внимательность, увеличивает вероятность поражения. Более того, оно усугубляет его тяжесть. Несомненно, отягощают электротравму болезненные состояния, истощающие нервную систему. В том же направлении действует алкогольное опьянение [106].

Люди, одурманенные алкоголем, утрачивают, как известно, контроль за своими действиями. Лица электропрофессий, находящиеся в состоянии алкогольного опьянения, чаще обычного совершают грубые ошибки и становятся жертвами собственной неосторожности. К тому же организм пьяного человека особенно сильно поражается электрическим током, ибо под воздействием алкоголя центральная нервная система частично, а в ряде случаев и полностью утрачивает свою подстраховочную роль в управлении системами дыхания и кровообращения.

Фармакологическими фонами можно, как это показали К. А. Ажибаев и Э. С. Саалиев, искусственно изменить чувствительность организма к току [3].

Из заболеваний, специфически увеличивающих тяжесть электротравмы, надо назвать нарушение функции щитовидной железы. К той же категории обычно относят и такое распространенное сердечное заболевание, как стенокардия. Последняя уже числится в списке заболеваний, препятствующих приему на работу, связанную с возможностью электропоражений, но сформулировано это ограничение недостаточно жестко. Указано, что приему на такую работу препятствуют частые приступы стенокардии. Но сердце у человека — наиболее ранимый для электрического тока орган, и даже легкие

электротравмы могут вызвать спазм коронарных сосудов сердца, т. е. как раз те нарушения, которые характерны для стенокардии.

К сожалению, высказывания о повышенной чувствительности людей к электрическому току при некоторых заболеваниях основаны, как правило, на единичных наблюдениях и поэтому нередко противоречивы.

В работах Л. Вольтера указано, что при больном сердце смерть от электрического тока наступает внезапно, а при здоровом — нет. Н. А. Вигдорчик приводит противоположное суждение. Он пишет:

«Мы знаем случай, когда соприкосновение с токоведущими частями под напряжением в несколько тысяч вольт прошло благополучно у человека, страдавшего тяжелой аневризмой аорты, которая имела такие размеры, что пульсация аневризмального мешка была отчетливо видна через истонченную грудную кость».

С. Еллинек, основываясь на своих наблюдениях, равным образом приводит случаи, когда при наличии порока сердца электрические травмы, вызванные высоким напряжением, не усугубляли заболевания сердца.

Собственные наблюдения дают и нам основание подвергать сомнению безусловность повышенной опасности электротравмы при некоторых заболеваниях сердца. Дважды мы наблюдали благополучные исходы электротравм у людей с больным сердцем. В одном из этих случаев пострадавший незадолго до происшествия перенес инфаркт миокарда.

Все это показывает, что вопрос о влиянии болезненных состояний организма на исход электротравмы еще требует глубокого изучения. Но сейчас, до завершения таких исследований, следует принять за правило, что любое заболевание сердца, и в особенности питающих его сосудов, является противопоказанием для приема на работу, связанную с возможностью электропоражений.

Не установлен еще и полный перечень заболеваний нервной системы, препятствующих приему на работу по эксплуатации электрооборудования. Одно несомненно — по мере изучения проблемы этот список будет расширяться и включать в себя, конечно, не только те три-четыре заболевания, которые фигурируют в нем в настоящее время.

Проведенное выше рассмотрение вопроса о том, как состояние пораженного организма сказывается на исходе электротравм, следует дополнить рассмотрением обратной зависимости, а именно как электротравмы, не закончившиеся смертью пораженных, отражаются на состоянии их здоровья.

6.7. Состояние пораженного организма

Неоднократно замечено, что при полной идентичности поражающих факторов электрической цепи через тело человека исходы электротравм бывают весьма различными. Естественно, это связывается с состоянием здоровья человека, подвергшегося «электрической атаке».

Болезни человека, утяжеляющие исходы электротравм. Не будет, пожалуй, преувеличением сказать, что многие патологические (болезненные) состояния человека вызывают те или иные сдвиги в тепловой и биоэлектрoхимической напряженности организма, приводят к изменениям ряда параметров его элементарных частиц и к прочим отклонениям на макро- и микроуровнях, причем все это либо непосредственно, либо опосредованно (через нервную систему) сказывается на исходе электротравмы.

Например, утомление, возникающее к концу рабочего дня, снижая внимательность, увеличивает вероятность поражения. Более того, оно усугубляет его тяжесть. Несомненно, отягощают электротравму болезненные состояния, истощающие нервную систему. В том же направлении действует алкогольное опьянение [106].

Люди, одурманенные алкоголем, утрачивают, как известно, контроль за своими действиями. Лица электропрофессий, находящиеся в состоянии алкогольного опьянения, чаще обычного совершают грубые ошибки и становятся жертвами собственной неосторожности. К тому же организм пьяного человека особенно сильно поражается электрическим током, ибо под воздействием алкоголя центральная нервная система частично, а в ряде случаев и полностью утрачивает свою подстраховочную роль в управлении системами дыхания и кровообращения.

Фармакологическими фонами можно, как это показали К. А. Ажибаев и Э. С. Саалиев, искусственно изменить чувствительность организма к току [3].

Из заболеваний, специфически увеличивающих тяжесть электротравмы, надо назвать нарушение функции щитовидной железы. К той же категории обычно относят и такое распространенное сердечное заболевание, как стенокардия. Последняя уже числится в списке заболеваний, препятствующих приему на работу, связанную с возможностью электропоражений, но сформулировано это ограничение недостаточно жестко. Указано, что приему на такую работу препятствуют частые приступы стенокардии. Но сердце у человека — наиболее ранимый для электрического тока орган, и даже легкие

электротравмы могут вызвать спазм коронарных сосудов сердца, т. е. как раз те нарушения, которые характерны для стенокардии.

К сожалению, высказывания о повышенной чувствительности людей к электрическому току при некоторых заболеваниях основаны, как правило, на единичных наблюдениях и поэтому нередко противоречивы.

В работах Л. Вольтера указано, что при больном сердце смерть от электрического тока наступает внезапно, а при здоровом — нет. Н. А. Вигдорчик приводит противоположное суждение. Он пишет:

«Мы знаем случай, когда соприкосновение с токоведущими частями под напряжением в несколько тысяч вольт прошло благополучно у человека, страдавшего тяжелой аневризмой аорты, которая имела такие размеры, что пульсация аневризмального мешка была отчетливо видна через истонченную грудную кость».

С. Еллинек, основываясь на своих наблюдениях, равным образом приводит случаи, когда при наличии порока сердца электрические травмы, вызванные высоким напряжением, не усугубляли заболевания сердца.

Собственные наблюдения дают и нам основание подвергать сомнению безусловность повышенной опасности электротравмы при некоторых заболеваниях сердца. Дважды мы наблюдали благополучные исходы электротравм у людей с больным сердцем. В одном из этих случаев пострадавший незадолго до происшествия перенес инфаркт миокарда.

Все это показывает, что вопрос о влиянии болезненных состояний организма на исход электротравмы еще требует глубокого изучения. Но сейчас, до завершения таких исследований, следует принять за правило, что любое заболевание сердца, и в особенности питающих его сосудов, является противопоказанием для приема на работу, связанную с возможностью электропоражений.

Не установлен еще и полный перечень заболеваний нервной системы, препятствующих приему на работу по эксплуатации электрооборудования. Одно несомненно — по мере изучения проблемы этот список будет расширяться и включать в себя, конечно, не только те три-четыре заболевания, которые фигурируют в нем в настоящее время.

Проведенное выше рассмотрение вопроса о том, как состояние пораженного организма сказывается на исходе электротравм, следует дополнить рассмотрением обратной зависимости, а именно как электротравмы, не закончившиеся смертью пораженных, отражаются на состоянии их здоровья.

Описание таких электротравм представляет собой самостоятельную тему медицинского профиля. Она подробно разработана, например, в работе К. А. Ажибаева. Здесь укажем лишь на некоторые общие положения.

Восстановление саморегулирующейся системы дыхания — сердце после электротравмы в ряде случаев не проходит бесследно. Так, С. Кёппен и П. Осипка одним из серьезных последствий электротравмы считают сердечное заболевание, именуемое стенокардией. С. Кёппен классифицирует ее по двум группам — органической и функциональной. К первой он относит нарушения нормальной деятельности сердца, точнее, его желудочков, в результате чего происходит нарушение обменных процессов сердца. Ко второй, точно не определяемой, он относит разные иные нарушения, подпадающие под общую классификацию стенокардического заболевания. Все эти нарушения очень четко фиксируются изменениями на электрокардиограммах. В отдельных случаях через месяц и более у пострадавшего, как пишет С. Кёппен, наблюдаются явления, аналогичные инфаркту миокарда с тяжелыми повреждениями задней стенки желудочков. Наблюдаются сильнейшие боли в предплечье, мучительный кашель, головокружение, увеличение сердечной мышцы и т. п., причем все это на фоне характерных стенокардических болей. Некоторые из пострадавших становятся полностью инвалидами, другие восстанавливают свою работоспособность через ряд месяцев.

Рассмотренная выше связь между исходом электротравмы и состоянием здоровья человека до возникновения электрической цепи через его тело является одним из сравнительно узких аспектов весьма широкой проблемы условий существования человека в мире электрических воздействий. Эта проблема освещена в ряде работ автора. Здесь коснемся лишь одной из ее сторон, а именно использования электричества в качестве лечебного средства.

О первых таких попытках, относящихся еще к концу XVIII века, уже упоминалось в § 6.1. настоящей книги. С тех пор дело продвинулось далеко вперед, хотя и не во всех отношениях успешно.

Сила и слабость электротерапевтических методов. Исследования, проведенные в конце 70-х и в начале 80-х годов в СССР и за рубежом на клеточном и мембранном уровнях, способствовали лучшему пониманию механизма воздействия электричества как в целом, так и каждого из его параметров в отдельности на биообъекты, в особенности на нейроны (нервные клетки).

Установлено, что мембрана этих клеток начинает реагировать на электрический ток уже при значении его всего 10^{-12} А. А разрушается нейрон при взаимодействии с ним электрической энергии, равной 10^{-20} Дж. Рабочая гипотеза, согласно которой смертельные исходы электротравмы (а также исключительная сложность лечения последствий тяжелой электротравмы у лиц, оставшихся в живых после поражений) объясняются прохождением электрической цепи через акупунктурные точки, получила бесспорное подтверждение. Доказано, в частности, что значения тока и мощности, поражающие нейрон (а он относится к невосстанавливающимся клеткам), возможны и тогда, если соприкосновение тела человека с токоведущими частями, находящимися под напряжением, произошло не только непосредственно в акупунктурных точках, но и в близких к ним зонах тела. В этом, к слову сказать, одно из убедительных доказательств нецелесообразности расчета и осуществления защитных мероприятий по значениям отпускающего и неотпускающего токов, т. е. токов, находящихся в пределах 20—100 мА при напряжении 12—36 В.

В связи с этим целесообразно вспомнить дискуссию, возникшую при внедрении в медицинскую практику электрошоковой терапии. Быстрота и эффективность излечения ею ряда недугов привели к появлению в СССР и за рубежом большой группы сторонников этого метода лечения. Однако, когда вслед за первыми впечатляющими результатами начался этап широкого внедрения и были отмечены смертельные исходы лечения, электрошоковая терапия при значениях тока примерно 20—40 мА была категорически запрещена. Было установлено, что даже малый ток при малом напряжении сопровождается гибелью многих нервных клеток — невоспроизводимых нейронов. Возможно, что когда биофизические процессы взаимодействия электрического тока с человеком, прежде всего с центрами управления его внешним дыханием и сердечной деятельностью, с эндокринной системой и другими жизнеопределяющими системами, станут известны более полно, электрошоковая терапия вновь войдет в лечебную практику.

Весьма распространен и такой вид электролечения, как ионофорез. Он заключается в том, что на тело человека накладывают ткани, пропитанные тем или иным лекарственным соединением, а поверх помещают электроды, через которые пропускают постоянный ток. С потоками образовавшихся ионов лекарственные соединения поступают через кожу человека в его организм. Плотность тока при этих процедурах

достаточна велика, но клеточные мембраны не разрушаются, что надо поставить в связь с одновременным введением электролитическим способом в тело пациента лекарственных соединений. За полуторастолетнюю историю применения этого метода не было случаев смертельных поражений. Правда, лечение порой не дает эффекта, но это можно объяснить неудачным для данного больного подбором лекарственных средств, малым числом отпущенных ему процедур и т. д.

Метод электроанестезии получает все более широкое применение в связи с тем, что он свободен от существенного недостатка химических методов наркоза — кумулятивных процессов (накапливания лекарств, не выводимых своевременно из организма). Электроанестезия использует токи высокой частоты. Конечно, механизм тут иной, чем при воздействии токами 50 Гц, но гибель какой-то части нейронов все же не исключена. Ведь та или иная энергия тока высокой частоты поглощается кожей, в частности через акупунктурные точки. Лишь после тщательного изучения можно будет вынести суждение о сравнительных достоинствах электрических и химических методов наркоза.

Глава седьмая

СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЗАЩИТА ОТ НЕГО

7.1. Основные представления об электризации

Статическое электричество (СЭ) — явление, вызванное накоплением и концентрацией электрических зарядов в процессе электризации. Электризация, в свою очередь, представляет собой явление, сопровождающее процессы трения некоторых материалов, находящихся в твердой, жидкой и газообразной фазе и во взаимном перемещении. СЭ прямо или косвенно связано с движением или перемещением воздействующего на материал объекта. В процессе работы образование и накопление зарядов обусловлены наличием соприкасающихся поверхностей, и хотя бы одна из контактирующих поверхностей должна быть из диэлектрического материала.

Процесс электризации характеризуется одновременным появлением «электричества» положительного и отрицательного знака, образуется своеобразный двойной слой. Возникно-

вление двойного электрического слоя объясняется переходом электронов в элементарных донорно-акцепторных актах на поверхности контакта; неодинаковые свойства материалов поверхностей контакта объект — материал определяют знак заряда. Заряды будут оставаться на поверхностях после их разделения только тогда, когда время нарушения контакта будет меньше времени релаксации зарядов. Это в значительной степени определяет общую величину заряда на отдельных поверхностях.

В книге «Статическое электричество в химической промышленности» [66] подробно описываются процессы химической технологии, при которых возникает электризация. Содержится описание электризации двухфазного потока. Приведенная физическая модель отвечает представлениям, объясняющим адгезию твердых тел. Этот процесс детально разработан Б. В. Дерягиным и его учениками. Полученные ими зависимости позволяют установить корреляционную связь гидродинамических характеристик двухфазного потока с электростатическими и найти им практическое применение.

Во многих случаях СЭ возникает при наличии потока воздуха, имеющего соприкосновение с материалом, характеризующимся достаточно большим значением удельного электрического сопротивления.

СЭ в значительной степени зависит от влажности окружающей среды. Степень ионизации воздуха определяется минимальным значением содержания влаги. Для изучения СЭ необходимо знать основные его параметры: величину электростатических зарядов, удельное электрическое сопротивление (объемное и поверхностное) и диэлектрическую проницаемость материалов, а также основные характеристики электростатического поля: напряженность, потенциал и энергию зажигания. Под электростатическим полем следует понимать в данном рассмотрении частную форму проявления электромагнитного поля, создаваемого концентрацией электрических зарядов, поэтому оно и характеризуется параметрами, общими для определения электрического поля. Особенность его — большое внутреннее электрическое сопротивление, проявляющееся, как правило, в образовании электрического тока в виде разрядов и сильной ионизации окружающей среды.

Разряды СЭ являются следствием процессов электризации или перемещения заряженных поверхностей и объемов. Различают два вида разрядов СЭ, способных воспламенить горючие смеси при оптимальных условиях: искровой разряд и коронный разряд, определяющийся максимальной напряженностью поля и степенью его неоднородности.

Электростатические заряды образуются на людях при их зарядении по индукции, в процессах контактной электризации и в результате контакта с заряженными материалами.

В условиях, когда диэлектрические поверхности подвергаются статической электризации или электризации в поле коронного разряда, на них образуются заряды с поверхностной плотностью σ , значение которой зависит от плотности тока электризации, электростатических и электропрочностных свойств диэлектрика.

Другими параметрами являются удельное электрическое сопротивление (объемное и поверхностное) и диэлектрическая проницаемость. Если диэлектрическая проницаемость определяет знак приобретаемых зарядов, то удельное электрическое сопротивление вместе с диэлектрической проницаемостью характеризует способность материала к накоплению и сохранению электростатического заряда. Поверхностное электрическое сопротивление бывает значительно ниже объемного, так как на поверхности диэлектрика имеются загрязнения, пленка влаги с растворенными в ней различными веществами. На значение поверхностного электрического сопротивления влияют температура и влажность окружающей среды. Поэтому поверхностное сопротивление часто играет существенную роль как в самом процессе электризации, так и при рассеивании зарядов.

Степень статической электризации в различных процессах и аппаратах характеризуется значением электростатического потенциала. Потенциал является энергетической характеристикой электростатического поля, образованного совокупностью зарядов СЭ. Силовой характеристикой является напряженность поля. Зная основные характеристики поля, можно оценить вероятность пробоя среды и возникновение электрических разрядов.

И наконец, определяющей характеристикой является минимальная энергия зажигания, характеризующая чувствительность любой горючей смеси к тепловому воздействию [1]. Зная ее, можно установить допустимое значение энергии, выделяемой при электрическом разряде во взрывоопасной среде, характеризовать воспламеняемость горючих смесей от электрического разряда, классифицировать их по этому признаку, разработать меры защиты.

7.2. Источники статического электричества

Источником СЭ может быть заряд, накопленный на устройстве — своеобразном конденсаторе большой емкости.

Пример 7.1. Производились испытания высоковольтного кабеля 3 кВ. Испытательное напряжение 30 кВ подавалось на шину кабеля, его заземленную оболочку и через нее на «землю». Кабель испытание выдержал. Один из членов испытательной бригады переносным заземлителем коснулся каждой из фаз, в результате чего после каждого касания возникла кратковременная искра. Испытующий решил, что заряд снят, и собрался уходить. В это время он заметил, что оставил на шине подвешенный к масляному выключателю разводной ключ и полез за ним. Шина непосредственно подходила к концам кабеля. В момент касания с шиной возникла искра, и человек был смертельно поражен. Произошло одноразовое касание. Оказалось, что при заземлении заряд полностью не был снят, а человек был поражен остаточным зарядом СЭ от испытуемого кабеля напряжением 10 кВ.

Пример 7.2. На предприятии, изготовляющем прорезиненный материал, в момент отделения прорезиненной ткани от металла возникла искра статического разряда, которым была поражена работница.

В обоих приведенных примерах следов поражения током на теле погибших не обнаружено. Судебно-медицинское заключение: смерть наступила от прекращения деятельности системы дыхания, что не противоречит характеристике исхода электропоражения.

Пример 7.3. В 1955 г. произошел взрыв емкости, из которой загружали нефть в танкер [1]. В опорожнявшуюся емкость закачивали воду. Взрыв произошел, когда объем воды в емкости был примерно равен объему подводящих трубопроводов. Вероятной причиной взрыва был искровой разряд СЭ. Электрические заряды образовались в результате смешения нефти и воды.

Пример 7.4. В 1960 г. произошел взрыв сахарной пыли в металлической емкости. Частицы сахара наэлектризовались при транспортировании. Когда в емкости обрушилась большая масса заряженных частиц, индуктивно наведенный электрический заряд на незаземленной металлической конструкции вызвал искровой разряд, который и привел к зажиганию облака пыли.

Пример 7.5. При изготовлении резинового клея на поверхности смеси образуются электрические заряды плотностью 10 мкКл/м^2 , потенциал на поверхности достигает 20 кВ. В обычных условиях при непрерывном процессе горючая смесь в смесителе не образуется (концентрация паров выше верхнего предела воспламенения) и, хотя разряды следуют непрерывно, воспламенения не происходит. Но как только в аппараты попадает воздух (например, при разгрузке), происходит воспламенение и взрыв паров.

Пример 7.6. При выгрузке порошка пластмассы (минимальная энергия зажигания 15 МДж) дважды происходили взрывы. Причиной был искровой разряд с незаземленного бункера.

Трагические случаи с гибелью или тяжелыми травмами происходят при воспламенении горючих сред искровым разрядом с человека. В производствах диэлектрических порошков, пленок и подобных материалов человек заряжается при контакте с заряженной поверхностью или при ходьбе по диэлектрическим покрытиям пола.

7.3. Опасность статического электричества

Как было сказано выше, характер современного производства во многих случаях указывает на возможность возникновения СЭ и на необходимость его предупреждения. Но, к сожалению, оно становится объектом внимания в основном после несчастных случаев или нарушений технологических процессов.

Опасности, связанные с образованием СЭ, не всегда в достаточной мере учитываются на производстве; поэтому несчастные случаи часто бывают неожиданными и тяжелыми по последствиям. Лица, ответственные за технику безопасности и охрану труда на производстве, сталкиваются с трудностями обнаружения и устранения СЭ и не всегда могут дать соответствующие инструкции.

Электризация является также одним из наиболее трудноконтролируемых процессов. Неконтролируемый процесс электризации часто повышает брак, уменьшая производительность, и создает опасные условия работы. Искровые разряды, возникающие при электризации, могут привести к взрывам и пожарам, иногда с человеческими жертвами и тяжелыми травмами, нанести значительный материальный ущерб из-за выхода из строя оборудования.

Статистика взрывов и пожаров, сопровождаемых человеческими жертвами, а также материального ущерба по некоторым зарубежным странам свидетельствует о серьезной опасности СЭ и необходимости кардинального решения этой проблемы.

Ежегодные потери, по оценкам экономистов, по причинам, связанным с СЭ, возросли до 500 млн долларов. В США только за последний год было выплачено страховых пособий на сумму 7 млн долларов, из них 70 % пришлось на долю промышленных предприятий, пострадавших от пожаров и взрывов при обработке порошков. Недавняя серия взрывов привела к гибели 30 человек [1].

На конференции «Электростатика-85» [1] также отмечались сильные взрывы пыли на европейских предприятиях пищевой промышленности и американских предприятиях хлебопекарной промышленности.

Разработка методов оценки степени электризации и опасности СЭ является одной из важнейших проблем в разработке комплекса мероприятий, направленных на обеспечение условий безопасного функционирования технологического оборудования. Отсутствие в настоящее время общепринятых научно обоснованных критериев оценки степени электризации

и опасности СЭ нередко становится помехой на пути внедрения в промышленность новой, передовой технологии, современных аппаратов и машин, а также новых синтетических материалов. В этой связи большое практическое и теоретическое значение имеет разработка инженерных методов оценки опасности СЭ. А это, в свою очередь, связано с определением влияния электропроводности материалов на их электризацию и расчетом основных характеристик полей в рабочих объемах технологических аппаратов [1].

7.4. Защита технологического оборудования от опасных проявлений статического электричества

Эксплуатация установок, в которых возможно образование достаточного количества пылегазовой смеси с взрывоопасной концентрацией, требует принимать обязательные меры к устранению самопроизвольной электризации обрабатываемого продукта и различных деталей технологического оборудования [1].

Можно указать следующие основные методы устранения вредных и опасных проявлений статической электризации порошкообразных продуктов, имеющие практическое значение:

- заземление корпусов технологического оборудования;
- увеличение влагосодержания обрабатываемого продукта и окружающей среды;
- антистатическая обработка поверхностей диэлектрических аппаратов и продуктов;
- проведение технологического процесса в среде инертных газов;
- нейтрализация статического электричества продукта путем создания в окружающей газовой среде ионов противоположного знака.

Заземление как средство защиты от статического электричества является традиционным и обязательным (даже в ущерб технологии). Оно выполняется на всех электропроводящих участках технологического оборудования в соответствии с правилами защиты от статического электричества в промышленности.

Заземление выполняется по общим правилам заземления электроустановок, причем здесь вследствие малой мощности «генератора» зарядов допустимо сопротивление заземления до 100 Ом. Но заземление не дает полной гарантии искробезопасности процесса. При его помощи отводится на землю лишь часть заряда, накапливаемого на электропроводящих

корпусах оборудования, тогда как заряды, накапливаемые на диэлектрическом обрабатываемом материале, могут долго сохраняться, создавая при благоприятных условиях опасность возникновения искрового разряда.

Увеличение влагосодержания материала и ожигающего газового агента по многочисленным данным является радикальным способом устранения статической электризации в промышленности. Но, к сожалению, если такой способ устранения накопления статического электричества отчасти применим в других отраслях промышленности, то в процессах обработки материалов в аппаратах с дисперсными системами «газ — твердая фаза» он часто является не только не эффективным, но зачастую и невозможным вследствие изменения технологического режима и ухудшения качества продукции, а также вследствие слабой адсорбции влаги на поверхности частиц порошкообразных материалов.

Антистатическая обработка поверхностей технологического оборудования и материалами с помощью определенных химических составов может предотвратить возникновение зарядов или отвести их. Эти покрытия, во-первых, снижают трение между обрабатываемыми материалами и внутренними поверхностями различных участков технологического оборудования (имеют хорошие смазочные свойства), во-вторых, увеличивают электропроводность трущихся поверхностей и, наконец, создают химическое сродство. Положительным их свойством может оказаться также гигроскопичность. С применением таких покрытий, по-видимому, можно снизить электризацию. Но в настоящее время этот способ находится еще в стадии разработки и в порошковой промышленности определенный эффект получен лишь для некоторых комбинаций контактирующих материалов. В некоторых отраслях промышленности (текстильная, полиграфическая, нефтехимическая и резиновая) уже с успехом применяются антистатические покрытия.

Смысл осуществления технологических процессов в среде инертных газов заключается в уменьшении количества кислорода в смеси и тем самым в уменьшении вероятности взрыва. Однако такой способ является дорогостоящим.

Нейтрализация зарядов статического электричества тел путем создания в окружающей среде ионов противоположного знака получила широкое распространение в промышленности. Из многочисленных способов создания ионов в воздухе практическое значение имеют два:

ионизация воздуха излучением (с помощью радиоактивных препаратов);

ионизация воздуха с использованием электрических рядов.

Ниже приводятся (в процентах) различные меры борьбы со СЭ по данным института охраны труда Японии [68] :

Заземление	24,9
Специальные антистатические приспособления	14,0
Увеличение влажности	11,0
Антистатические вещества	10,6
Антистатическая обувь	6,6
Проводящие материалы	10,2
Меры по недопущению расширения ущерба от действия СЭ	4,1
Регулирование скорости движения	3,8
Ношение антистатической одежды	3,8
Задание условий работ	3,3
Проводящие полы рабочих помещений	3,2
Учет степени электризации материалов	1,3
Недопущение возникновения разряда	1,3
Другие меры	1,9

7.5. Контроль параметров статического электричества

Изучение явления статической электризации непосредственно связано с измерением ее параметров в лабораторных и заводских условиях. При проведении количественных измерений необходимо заранее знать свойства исследуемого объекта. Дело заключается в том, что электричество, которое возникает на проводнике, имеет одинаковую полярность и распределяется по поверхности проводника, создавая одинаковый потенциал. Поэтому, зная электрическую емкость проводника, легко определить заряд или потенциал проводника с помощью известных методов измерения, связанных с перемещением зарядов.

Электричество, возникшее на диэлектрическом материале, часто создает неопределенное состояние электризации — наряду с утечкой заряда вследствие электропроводности материала имеет место также утечка через газовый разряд; наблюдается неоднородное распределение зарядов. Кроме того, существенное влияние оказывают окружающая среда, свойства и геометрическая форма тел и т. д. Поэтому при проведении измерений необходимо тщательно выбирать в зависимости от условий методы и средства измерений. Например, когда заряд возникает на диэлектрике, то, так как подвижность заряда ничтожна, его невозможно измерять токовым прибором. Что касается потенциала поля этих за-

Таблица 7.1. Характеристики отечественных приборов для измерения статического электричества

Наименование и тип прибора	Пределы измеряемых параметров по паспорту	Входное сопротивление, Ом	Напряжение питания, В	Исполнение
Индикатор статического электричества МИЭП-1 и МИЭП-2	Потенциал до 40 000 В	—	Без питания	Взрывозащищенное
Статический вольтметр С-50	Напряжение до 30—3000 В	10^{10}	6—127—220	Обычное
Статический вольтметр с датчиком СМ-2/С-95	Потенциал на поверхности 30—3000 В	10^{10}	1,6	Взрывозащищенное
Электронный электрометр ПК-2-3А	Потенциал на поверхности 100—500 000 В; поверхностный заряд 0,2—20 мКл/м ²	10^{14}	1,5	Обычное
ИСЭП-9	Напряженность электрического поля до $2,6 \cdot 10^8$ В/м	10^{14}	1,5	Взрывозащищенное
ПЭ-1	Напряжение 0,3—3 В; напряженность электрического поля 10^2 — $5 \cdot 10^5$ В/м	10^{14}	3—127—220	Обычное
ПЭ-2	Напряжение 0—25 000 В	10^{14}	1,6	Взрывозащищенное
Динамический электрометр с вращающимся экраном ВИНЭП-2	Напряженность электрического поля $3 \cdot 10^3$ В/м	—	9	То же

рядов, его также нельзя измерить обычным вольтметром. В этих условиях говорить об электроемкости диэлектрика также бессмысленно. Методики измерения основных параметров СЭ приведены в работе В. К. Абрамина [1].

Таблица 7.2. Приборы для измерения статического электричества (Япония)

Метод измерений	Наименование прибора	Модификация	Диапазон измерений	Место применения	Конструкционные и эксплуатационные особенности
Измерительные приборы, принцип действия которых основан на взаимодействии кулоновских сил	Электростатическая насадка	I, III	I — 10 кВ III — 30 кВ	В местах, где существует опасность взрыва, возгорания ВВ, газа, пыли	Снабжен устройством, сигнализирующим о возможности взрыва; прост в обращении, работает в условиях высокой влажности
	Электростатический вольтметр	2	150—250—500 В	В лабораториях, на рабочих местах	Широкая область применения; может измерять значения заряда с использованием ячейки Фарадея; высокое входное полное сопротивление, емкость 12—40 пФ
	Измеритель электростатического поля	ЕА-03	3 кВ/см	То же	Определяет электрический заряд в воздухе, стоек к влажности и загрязнению, имеет источник питания, служащий для корректировки
	Измеритель электрического поля	225	10 кВ/см	На рабочих местах	Взрывозащищенный; может измерять электрический заряд в воздухе
Измерительные приборы оценки и предсказания электризуемости	Испытательная электростатическая установка	P-428	5—2000 В	В лабораториях	Снабжен указателем температуры, влажности, оптической установкой; метод нанесения заряда на материал — коронный разряд
	Измерительная установка степени электризации	КМ-511 КМ-711	Произвольное напряжение	В лабораториях, на рабочих местах	Измерение периода полуразряда; наблюдение за уменьшением заряда с помощью синхроскопа; метод нанесения заряда на материал — натирание и коронный разряд

Таблица 7.1. Характеристики отечественных приборов для измерения статического электричества

Наименование и тип прибора	Пределы измеряемых параметров по паспорту	Входное сопротивление, Ом	Напряжение питания, В	Исполнение
Индикатор статического электричества МИЭП-1 и МИЭП-2 Статический вольтметр С-50	Потенциал до 40 000 В Напряжение до 30—3000 В	—	Без питания	Взрывозащищенное
Статический вольтметр с датчиком СМ-2/С-95	Потенциал на поверхности 30—3000 В	10^{10}	1,6	Взрывозащищенное
Электрометр электронный: ПК-2-3А	Потенциал на поверхности 100—500 000 В; поверхностный заряд 0,2—20 мкКл/м ² Напряженность электрического поля до $2,6 \cdot 10^5$ В/м	10^{14}	1,5	Обычное
ИСЭП-9	Напряженность электрического поля до $0,3-3$ В; напряженность электрического поля $10^2-5 \cdot 10^5$ В/м	10^{14}	1,5	Взрывозащищенное
ПЭ-1	Напряжение 0—25 000 В	10^{14}	3—127—220	Обычное
ПЭ-2	Напряженность электрического поля $3 \cdot 10^3$ В/м	10^{14}	1,6	Взрывозащищенное
Динамический электрометр с вращающимся экраном ВИНЭП-2	Напряженность электрического поля $3 \cdot 10^3$ В/м	—	9	То же

Таблица 7.2. Приборы для измерения статического электричества (Япония)

Наименование прибора	Модификация	Диапазон измерений	Место применения	Конструкционные и эксплуатационные особенности
Электростатическая насадка	I, III	I — 10 кВ III — 30 кВ	В местах, где существует опасность взрыва, возгорания ВВ, газа, пыли	Снабжен устройством, сигнализирующим о возможности взрыва; прост в обращении, работает в условиях высокой влажности
Электростатический вольтметр	2	150—250—500 В	В лабораториях, на рабочих местах	Широкая область применения; может измерять значения заряда с использованием ячейки Фарадея; высокое входное полное сопротивление, емкость 12—40 пФ
Измеритель электростатического поля	ЕА-03	3 кВ/см	То же	Определяет электрический заряд в воздухе, стоек к влажности и загрязнению, имеет источник питания, служащий для корректировки
Измеритель электрического поля	225	10 кВ/см	На рабочих местах	Взрывозащищенный; может измерять электрический заряд в воздухе
Испытательная электростатическая установка	Р-428	5—2000 В	В лабораториях	Снабжен указателем температуры, влажности, оптической установкой; метод нанесения заряда на материал — коронный разряд
Измерительная установка степени электризации	КМ-511 КМ-711	Произвольное напряжение	В лабораториях, на рабочих местах	Измерение периода полуразряда; наблюдение за уменьшением заряда с помощью синхроскопа; метод нанесения заряда на материал — натирание и коронный разряд

Таблица 7.1. Характеристики отечественных приборов для измерения статического электричества

Наименование и тип прибора	Пределы измерений параметров по паспорту	Входное сопротивление, Ом	Напряжение питания, В	Исполнение
Индикатор статического электричества МИЭП-1 и МИЭП-2	Потенциал до 40 000 В	—	Без питания	Взрывозащищенное
Статический вольтметр С-50	Напряжение до 30—3000 В	10^{10}	6—127—220	Обычное
Статический вольтметр с датчиком СМ-2/С-95	Потенциал на поверхности 30—3000 В	10^{10}	1,6	Взрывозащищенное
Электронный электрометр ПК-2-3А	Потенциал на поверхности 100—500 000 В, поверхностный заряд 0,2—20 мКл/м ²	10^{14}	1,5	Обычное
ИСЭП-9	Напряженность электрического поля до $2,6 \cdot 10^3$ В/м	10^{14}	1,5	Взрывозащищенное
ПЭ-1	Напряжение 0,3—3 В; напряженность электрического поля 10^2 — $5 \cdot 10^4$ В/м	10^{14}	3—127—220	Обычное
ПЭ-2	Напряженность электрического поля 3— 10^3 В/м	10^{14}	1,6	Взрывозащищенное
Динамический электрометр с вращающимся экраном ВИНЭП-2	Напряженность электрического поля $3 \cdot 10^3$ В/м	—	9	То же

рядов, его также нельзя измерить обычным вольтметром. В этих условиях говорить об электроемкости диэлектрика также бессмысленно.

Методики измерения основных параметров СЭ приведены в работе В. К. Абрамова [1].

Таблица 7.2. Приборы для измерения статического электричества (Япония)

Метод измерений	Наименование прибора	Модификация	Диапазон измерений	Место применения	Конструкционные и эксплуатационные особенности
Измерительные приборы, принцип действия которых основан на взаимодействии кулоновских сил	Электростатическая насадка	I, III	I — 10 кВ III — 30 кВ	В местах, где существует опасность взрыва, возгорания ВВ, газа, пыли	Снабжен устройством, сигнализирующим о возможности взрыва; прост в обращении, работает в условиях высокой влажности
	Электростатический вольтметр	2	150—250—500 В	В лабораториях, на рабочих местах	Широкая область применения; может измерять значения заряда с использованием ячейки Фарадея; высокое входное полное сопротивление, емкость 12—40 пФ
	Измеритель электростатического поля	ЕА-03	3 кВ/см	То же	Определяет электрический заряд в воздухе, стоек к влажности и загрязнению, имеет источник питания, служащий для корректировки
	Измеритель электрического поля	225	10 кВ/см	На рабочих местах	Взрывозащищенный; может измерять электрический заряд в воздухе
Измерительные приборы оценки и предсказания электризуемости	Испытательная электростатическая установка	P-428	5—2000 В	В лабораториях	Снабжен указателем температуры, влажности, оптической установкой; метод нанесения заряда на материал — коронный разряд
	Измерительная установка степени электризации	КМ-511 КМ-711	Произвольное напряжение	В лабораториях, на рабочих местах	Измерение периода полуразряда; наблюдение за уменьшением заряда с помощью синхроскопа; метод нанесения заряда на материал — натирание и коронный разряд

В табл. 7.1 и 7.2 даны характеристики некоторых типов отечественных и зарубежных приборов, применяемых для исследования параметров СЭ.

В заключение подчеркнем необходимость составления паспорта производства по электростатической искробезопасности [1]. Это позволит выявить нарушение правил защиты от СЭ, составить схему технологического процесса с картой уровней электризации, а также установить на технологическом оборудовании зоны, где происходит генерирование зарядов, и т. д.

Глава восьмая

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ЧЕРЕЗ ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА

8.1. Основные особенности

Электрическое сопротивление цепи через тело человека, возникающее при электротравме, состоит из электрического сопротивления проводов — активного и индуктивного, электрического сопротивления машин, аппаратов или приборов, оказавшихся последовательно включенными с телом человека, электрического сопротивления переходного контакта между токоведущими частями оборудования, которых коснулся человек, и собственно электрического сопротивления тела человека (рис. 8.1).

Ранее при рассмотрении инструментального анализа электротравм показано, как многообразны варианты электрической цепи: от цепей с большими емкостями до цепей с очень большой индуктивностью дросселей, электрических машин, релейных цепей. Конечно, полные значения параметров электрических элементов, оказавшихся включенными в цепь последовательно с телом человека, определить нелегко. Это требует кропотливого труда, но является обычной решаемой электротехнической задачей. Подлинные трудности возникают при определении переходного электрического сопротивления тела человека.

Содержание предыдущих глав показывает, сколь разнообразны реакции живого организма на действие электрического тока. Неоднократно говорилось о сложном комплексном сопротивлении, требующем учета всех видов электропроводности неживой природы и многих специфичных ее видов,

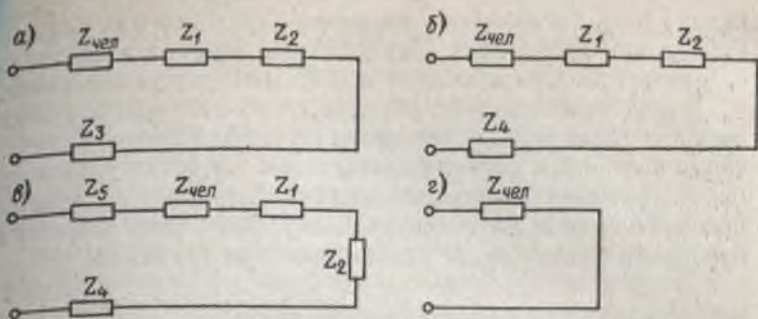


Рис. 8.1. Схемы поражения электрическим током при однополюсном (а, б, в) и двухполюсным (г) прикосновении к токоведущим частям оборудования

$Z_{чел}$ — сопротивление тела человека; Z_1 — сопротивление обуви или одежды; Z_2 — сопротивление пола или площадки, на которой находился человек; Z_3 — сопротивление земли и заземлителей; Z_4 — сопротивление заземляющего провода; Z_5 — сопротивление элементов оборудования, оказавшихся в электрической цепи с телом человека

присущих только живому организму. О характере возникающих при этом трудностей можно судить хотя бы по тому, что энергия связей в элементарных частицах биологических молекул и, что особенно важно, в биологических мембранах составляет всего тысячные доли электрон-вольта, в то время как ионизационный потенциал, характеризующий эти связи, достигает 15—30 эВ. Возможно, именно в этом заключается главное отличие «живого» от «неживого».

Если учесть, что теоретическая и экспериментальная физика открывает все новые и новые элементарные частицы, новые виды взаимодействия биополимеров, то приведенное выше предположение приобретает особое значение. Автор убежден, что глубокое и разностороннее изучение причин и последствий электротравм не только поможет изжить электротравматизм, но и окажется полезным при раскрытии многих тайн живой и неживой природы. Немалый интерес представляет, в частности, изучение емкостной составляющей полного электрического сопротивления, о чем читатель получит некоторое представление при ознакомлении с § 8.5.

Электрическое сопротивление тела человека изучалось многими исследователями разного профиля. Не потеряли значения работы отечественного ученого А. Р. Тишкова почти столетней давности, а также исследования Х. Фрайберге-ра [95], изложенные им в монографии, посвященной электрическому сопротивлению тела человека переменному и посто-

В свою очередь, физиологи и патофизиологи, в частности Н. А. Вигдорчик [12], занимавшиеся этими вопросами, допускали другую ошибку, оставляя без рассмотрения такие сложные физические явления, как нелинейные зависимости параметров элементов, составляющих электрическую цепь через тело человека.

Только в конце 30-х годов у нас и за рубежом стали появляться исследования, в которых делается попытка рассмотреть электрическое сопротивление тела человека как многообразный комплекс биофизических, биохимических, физических и физиологических явлений. К таким исследованиям следует прежде всего отнести самобытные труды Н. Б. Познанской, убедительно раскрывшей природу электрического сопротивления тела человека, особенно его кожи (см. § 6.4).

В известной степени эти закономерности описываются и в настоящей главе, хотя ее задача намного уже — рассмотреть электрическое сопротивление тела человека между двумя наложенными на него электродами, определить составляющие этого сопротивления и, наконец, выяснить его зависимость от некоторых физических и физиологических факторов. Эту задачу автор сознательно ограничил кругом вопросов, связанных с оценкой параметров электрической цепи, вызывающих электрические поражения, и с разработкой соответствующих профилактических мероприятий.

8.3. Нелинейность электрического сопротивления живой ткани

Даже если отвлечься от биофизических явлений, то и тогда тело человека надо рассматривать как сложнейший проводник. Попад в электрическую цепь, оно становится ее элементом, обладающим, во-первых, объемом и, во-вторых, неоднородной полупроводящей структурой. Поэтому позицию исследователей, рассматривающих тело человека как некое линейное сопротивление, следует считать ошибочной. Ведь уже давно появились указания на то, что это электрическое сопротивление нелинейно. Так, К. Альвенслебен подсчитал, что электрическое сопротивление тела человека изменяется в зависимости от напряжения более чем в 20 раз. Однако численных закономерностей, по которым можно было бы рассчитать цепь, он не получил. К сожалению, наблюдения, сделанные К. Альвенслебеном около 50 лет назад, не привлекли к себе внимания специалистов по электробезопасности. Каких-либо практических выводов из этих наблюдений сделано не было.

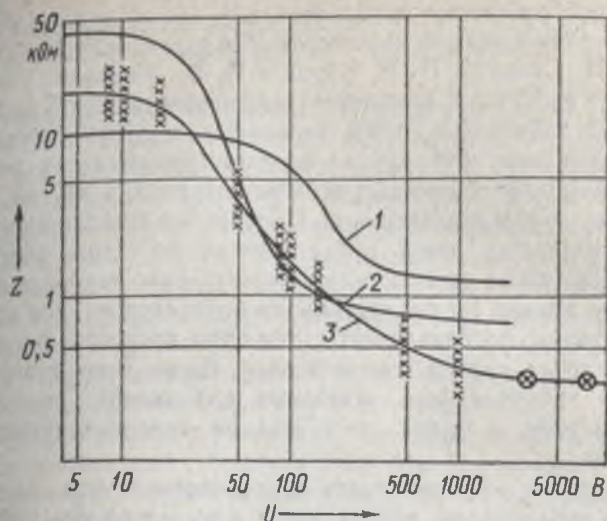


Рис. 8.2. Зависимость электрического сопротивления Z тела человека от напряжения U

1 и 2 — по Х. Фрайбергеру [95]; 3 — по наблюдениям автора; кружками обозначены данные, установленные по записям осциллографа в момент поражения

Зависимость комплексного электрического сопротивления тела человека от напряжения, полученная Х. Фрайбергером и нами, приведена на рис. 8.2. Как видно из рисунка, при напряжении 12 и 36 В поражение может произойти, если сопротивление между двумя электродами, расположенными на теле, находится в пределах 8—12 кОм, поверхность электродов — по 60 см².

Нелинейность электрического сопротивления присуща различным тканям и органам человеческого тела. П. Осипка говорит о нелинейном сопротивлении одной лишь кожи. Но это же следует отнести и к внутренним органам, особенно к нервной системе и крови. Нелинейность электрического сопротивления непостоянна и для каждой ткани и органа различна. На зависимость диэлектрической проницаемости различных органов от частоты тока указывают, в частности, работы Х. Швана, Н. Н. Малова и С. Н. Ржевкина.

Широкое применение высокочастотного разогрева диэлектриков в настоящее время заставило взяться за изучение сред, обладающих различными значениями диэлектрической проницаемости, например пластикатов, высокомолекулярных полимеров и других материалов, имеющих прослойки и включения из разнородных веществ. А. Винеру удалось получить

некоторые расчетные выражения для систем с комплексной диэлектрической проницаемостью. Сюда же примыкают труды Г. И. Сканава. И. Н. Бурак и И. В. Жиленков сделали попытку рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость двухфазной системы различных структур, исходя из предположения, что один из компонентов обладает диэлектрической проницаемостью дебаевского типа, а другой является идеальным диэлектриком. Полученные ими закономерности расширяют наше представление об этих системах. Е. Н. Чистякова рассмотрела соответственно четырехфазную систему. Но как бы эти системы ни были сложны, все же они элементарны по сравнению с тем, что представляет собой с этой точки зрения тело человека. Даже зная диэлектрическую проницаемость отдельных его тканей, рассчитать всю систему в целом пока еще не представляется возможным.

Изучение электрического сопротивления тела человека сильно продвинулось вперед, когда в исследовательский обиход были внедрены измерения сопротивлений на высоких частотах. Эти измерения впервые показали, что электрическое сопротивление внутренних органов является преимущественно активным сопротивлением, а емкостная составляющая полного сопротивления обусловлена в основном сопротивлением кожи.

Вызванное физическими раздражителями изменение емкостной составляющей полного сопротивления живого организма отличается от изменения активной составляющей того же сопротивления. При некоторых раздражителях емкостное сопротивление уменьшается, активное сопротивление растет. Из наших работ следует, что емкостной составляющей обладает и электрическое сопротивление мышцы.

На высоких частотах угол сдвига между током и напряжением становится особенно заметным.

Мы видим, какое огромное число факторов влияет на значение электрического сопротивления живого организма. Это сопротивление принципиально отлично от любого электрического сопротивления (линейного и нелинейного) в неживой природе. Но от чего бы оно ни зависело, каким бы колебаниям оно ни подвергалось, при анализе электротравм и разработке защитных мероприятий необходимо знать и оценивать хотя бы порядок численных значений этого параметра электрической цепи между двумя электродами, наложенными на тело.

8.4. Численные оценки электрического сопротивления тела человека

Условность общих оценок. Попытки определить численное значение электрического сопротивления тела человека начались еще в конце прошлого века. И. П. Тишков указывал, что электрическое сопротивление между двумя электродами, наложенными на тело умершего человека, находится в пределах $2 \cdot 10^7$ — $1 \cdot 10^8$ Ом, при соскабливании эпидермиса оно падает на несколько порядков. А. Хитцинг в опытах на живом человеке нашел, что при аналогичных обстоятельствах сопротивление уменьшается с $1 \cdot 10^4$ до $0,6 \cdot 10^4$ Ом. Смачивание кожи раствором поваренной соли уменьшает, по С. Еллинеку, сопротивление более чем в три раза.

М. Гильдемейстер указывает, что сопротивление тела человека колеблется от $4 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^6$ Ом. В некоторых источниках называются уже не пределы, а точные значения. Американские нормы оценивают значение сопротивления тела человека в $1 \cdot 10^3$ Ом, что встречает поддержку Г. Болла, указывающего $0,9 \cdot 10^3$ Ом. Но существуют и другие мнения. Вот крайние случаи: Х. Буртон рекомендует сопротивление тела человека принимать равным $0,5 \cdot 10^3$ Ом, тогда как П. Лоран называет $3 \cdot 10^3$ Ом. К сожалению, ни один из этих авторов не связывает приводимых значений электрического сопротивления с напряжением, и только Х. Фрайбергер делает это с исчерпывающей ясностью.

В нашей стране численные определения электрического сопротивления тела человека выполнили Э. И. Александров, М. И. Бараш, А. Н. Каканович, В. И. Шуцкий, А. П. Киселев. Подытоживая мнения названных отечественных авторов, А. П. Киселев называет в качестве минимального значения сопротивления тела человека $1 \cdot 10^3$ Ом для частоты 50 Гц, если площадь соприкосновения тела человека с электродом находится в пределах 15 — 20 см².

Измерения электрического сопротивления тела человека обычно проводятся обстоятельно, но противоречия не сглаживаются. Называется общее значение сопротивления в омах, но не указываются ни площади поверхностей электродов, ни силы, с которыми они давили на кожу. Если сообщается о сопротивлении при петле «рука — рука», то не уточняется, в какой части руки — тыльной или ладонной — произошел контакт.

Справедливы слова Н. А. Вигдорчика [12], который, подчеркивая недостатки в оценке значения электрического сопротивления тела человека, указывал, что «...изучавшие

этот вопрос всегда говорят просто о сопротивлении, не поясняя, к какой поверхности или какому объему изучаемой ткани относятся полученные цифры».

В наши дни ясно, что даже учет отмеченных Н. А. Вигдорчиком упущений недостаточен для оценки полного электрического сопротивления тела человека.

Пожалуй, тело человека в электрической цепи остается теперь уже единственным проводником, сопротивление которого исследователи считают возможным оценивать столь условно. В какой-то мере подобная условность оправдывалась в прошлом множественностью обстоятельств, обуславливающих значение сопротивления. Но теперь имеются основания ожидать более точных численных определений.

Уже первые исследования показали, что общее электрическое сопротивление между двумя электродами, наложенными на тело, следует разделить на две части: сопротивление кожи и кровеносных сосудов и сопротивление нервов.

Кожа. Электрическое сопротивление кожи неодинаково у разных людей и даже на различных частях поверхности тела одного и того же человека; оно, так же как и полное сопротивление, зависит от физических параметров окружающей среды и состояния живого организма. Установлено, например, что выделение пота, сопровождающееся увлажнением кожи, сильно уменьшает ее электрическое сопротивление. В. Вагнер обнаружил, что сопротивление кожи людей с врожденным недостатком потовых желез не изменяется даже при значительной тепловой нагрузке. Подчеркнем лишний раз в связи с этим условность переноса на человека данных, полученных в эксперименте на собаках, кожа которых вообще лишена потовых желез.

Данные литературы однозначно свидетельствуют о том, что сопротивление кожи больше сопротивления внутренних тканей. Для того чтобы понять причину этого, рассмотрим, что же представляет собой кожа человека. Кожа является важнейшим органом человека. Через нее вводится в организм огромный объем информации о состоянии окружающей среды, осуществляются автотерморегуляция, дыхание. На поверхности кожи находятся миллионы микроорганизмов, осуществляющих также связь человека со средой. В литературе по электробезопасности эти обстоятельства замалчиваются, хотя они имеют огромное значение для моделирования электротравмы экспериментом на животных и для расследования несчастных случаев.

На рис. 8.3 показана структура кожи человека. Из рисунка видно, что кожа заполняет область от наружной за-

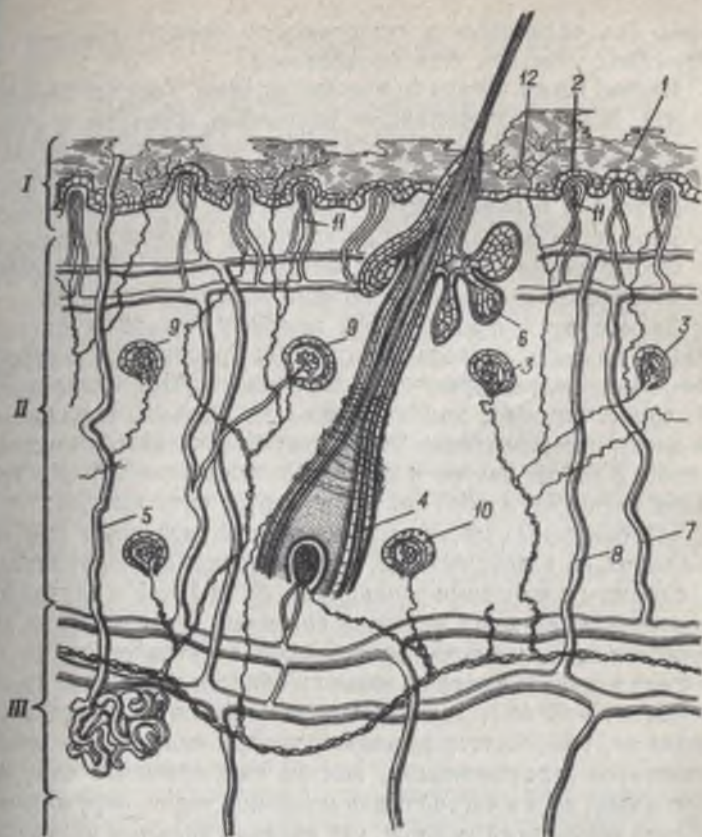


Рис. 8.3. Структура кожи человека

I — эпидермис; *II* — дерма; *III* — мышечная ткань, 1 — роговой слой; 2 — ростковый слой; 3 — сетчатый слой; 4 — волос; 5 — потовая железа; 6 — сальная железа; 7 — артериальный сосуд; 8 — венозный сосуд; 9 — рецептор холода; 10 — рецептор тепла; 11 — осязательный рецептор; 12 — нервные сплетения

щитной поверхности (эпидермиса) до мышечной ткани. Структурно кожа состоит из разных слоев, пронизанных периферическими нервами, окончания которых классифицируются как датчики различных физических явлений. Слои кожи заполнены капиллярными кровеносными сосудами, обеспечивающими ее кислородом и осуществляющими тканевое дыхание. На границе дермы и клетчатки расположены потовые железы. Выделение пота, сопровождающееся увлажнением эпидермиса, сильно изменяет электрическое сопротивление кожи особенно потому, что через кожу происходит диффузия

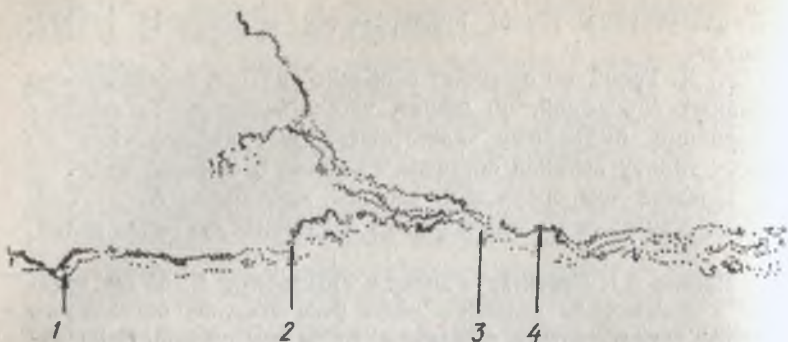


Рис. 8.5. Нервный ствол в зоне «знака тока» у морской свинки после экспериментальной электротравмы (биопсия взята через 5 дней после эксперимента)

1 — осевой цилиндр, веретенообразно утолщенный; 2 — утолщенный осевой цилиндр; 3 — волокна, входящие в состав нервного ствола и подвергшиеся изменениям (особенно сильно изменены миелиновые волокна, местами распавшиеся на сегменты); 4 — осевой цилиндр, распавшийся на продолговатые глыбки и зерна

Данные, приведенные А. Д. Троицкой, согласуются с наблюдениями В. А. Шедрикова, который в своей докторской диссертации «О морфологических изменениях в организме при смерти от переменного электрического тока малого напряжения и силы» еще в 1940 г. указывал на деформацию нервных окончаний в коже пострадавших от электрического тока, в том числе и при малых его значениях и малых напряжениях.

Все описанное является несомненным доказательством того, что нервы, служащие как бы путями тока по телу, подвергаются таким разрушениям, которые больше разрушений, производимых электричеством во всех других окружающих тканях.

Для читателя, внимательно ознакомившегося с предшествующим материалом книги, этот вывод не должен быть неожиданным. Расследование несчастных случаев и изучение действия электрического тока показывают, что исход электротравмы во многом определяется поражением нервной системы, наиболее чувствительной к электрическому току. Проявляется это, в частности, в резком изменении электрического сопротивления под влиянием некоторых раздражителей (рис. 8.6).

Определяющая роль электропроводности нервной системы человека в его системах регулирования была отмечена Б. Метьюсом, пытавшимся оценить численные значения про-

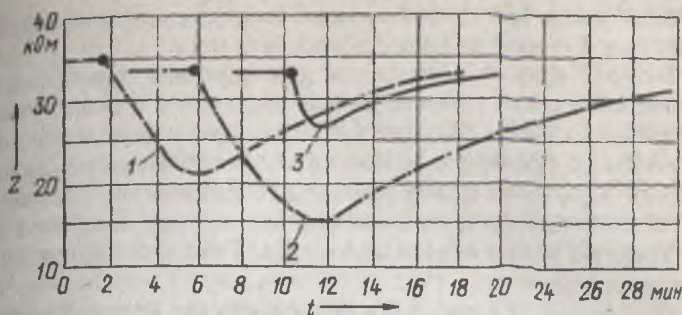


рис. 8.6. Зависимость электрического сопротивления Z тела человека от вида раздражителя
1 — укол; 2 — неожиданный звук; 3 — легкий удар по руке. Моменты раздражения обозначены точками

водимости нерва в целом, его оболочки и ствола в отдельности. Если оболочка обладает достаточно высоким удельным сопротивлением, то у «сердцевины» — ствола нерва оно крайне мало. Определение удельных сопротивлений нерва, да еще по отдельным структурным составляющим — дело непростое. Сложность его в том, что результаты посмертных измерений трудно экстраполировать на живой организм, а при экспериментальном определении на живом нерве включение его в измерительную схему, как бы мал ток ни был, отражается на результатах, поскольку изменяет электрофизические свойства нерва. Все же такая попытка определения удельного сопротивления нерва была вслед за Б. Метьюсом предпринята и нами. Использованный метод вольтметра — амперметра прост по решению, но труден в реализации, так как связан с применением микроэлектродов малых и сверхмалых токов (10^{-10} — 10^{-12} А). Удалось количественно оценить удельное сопротивление нервного ствола. Выяснилось, что оно лежит в пределах 0,02—0,06 Ом·м, что согласуется с данными работы Б. Метьюса. Удельное сопротивление нервного ствола почти на два порядка меньше удельного сопротивления крови, которое достоверно оценивается значениями 1,5—2,0 Ом·м, и почти на четыре порядка меньше удельного сопротивления тела человека в целом, условно оцениваемого значением $(1,5...2,0) 10^2$ Ом·м.

О том, что нервная ткань имеет самое низкое значение удельного сопротивления, свидетельствуют и данные Н. М. Ливенцева [42], показывающие, что спинномозговая жидкость, которую можно считать в какой-то мере аналогом нервов, имеет удельное сопротивление около 0,5 Ом·м, что

280—480 В/мм. В то же время пробы на людях, добровольно подвергшихся этим неопасным для жизни испытаниям, показали, что при расстоянии между электродами в несколько сантиметров и при определенном их расположении на теле можно наблюдать резкое изменение кривой тока по амплитуде и форме начиная с 15—20 В. Самый тщательный осмотр поверхности кожи сразу после испытаний ни разу не обнаружил следов «пробоя». По-видимому, относительно высокую напряженность электрического поля внутри тканей и их разную электрическую прочность следует объяснить своеобразным внутримолекулярным «пробоем», сопровождающимся разрывом связей в молекуле. Доказательством этого предположения служит то, что указанное явление сопровождается очень болезненными ощущениями. Сама же кожа при этих напряжениях не «пробивается» и «пробиться» не может вследствие ее высокой электрической прочности.

Одним из доказательств внутримолекулярного «пробоя» служит то, что через некоторое время после измерения (2—36 ч) на коже появляется покраснение, переходящее в долго не заживающие язвы. В случае если электроды наложены на запястья, эти язвы появляются уже при напряжении 6—15 В. Врачи отмечают своеобразие этого покраснения, его несходство с обычными воспалительными покраснениями, возникающими после порезов и уколов, оставленных без должной обработки.

Как показали результаты наших измерений, «пробой», даже приводящий к появлению следов на коже, не снижает сколько-нибудь заметно общего сопротивления и поэтому на порядке рекомендуемых значений сопротивления не отражается.

В дополнение к сказанному относительно определения численных значений электрического сопротивления тела человека между двумя наложенными на него электродами заметим, что значение этого сопротивления зависит и от химического состава окружающей человека среды. Точнее, оно зависит от парциального содержания в ней кислорода и углекислого газа (см. § 9.7).

Таким образом, можно сделать заключение, что повышение содержания кислорода в воздухе не только укрепляет организм, но и создает своеобразную «электрическую блокаду», понижая чувствительность к току.

Подводя итог анализу численных значений электрического сопротивления тела человека, подчеркнем еще раз, что оно существенно отлично от любых сопротивлений неживой природы. Поэтому никак нельзя согласиться с П. Осипка [109],

который пишет, что «человеческое тело можно рассматривать как комплексную систему различных электролитов и полупроводниковых мембран».

8.5. Полное электрическое сопротивление тканей тела

Эквивалентные схемы. В § 8.2 говорилось о том, что полное электрическое сопротивление тела человека включает в себя активную и емкостную составляющие, но не было показано, как обе эти составляющие взаимно связаны.

Сделать это непросто. Электрическое сопротивление тела человека нелинейно. Эта нелинейность чрезвычайно сложна: как уже указывалось, она зависит от физических, биохимических и биофизических факторов и о ней мало что достоверно известно. Поэтому приходится делать ряд допущений и прежде всего считать при первом рассмотрении, что электрическое сопротивление тела человека линейно, а затем уже по мере накопления экспериментального материала вносить необходимые уточнения. Основанием для такого допущения служит то, что большая часть биохимических и биофизических процессов проявляется не в первое же мгновение после электротравмы, а по истечении некоторого времени. Об этом свидетельствуют хотя бы кривые на рис. 8.6, показывающие изменение электрического сопротивления тела человека под влиянием физических раздражителей. Из этих кривых видно, что изменение наступает в течение минут, тогда как при оценке электрической цепи в процессе расследования несчастных случаев приходится решать вопрос о переходных процессах, длительность которых не превышает миллисекунд.

Еще сложнее обстоит дело с нелинейностью зависимости сопротивления от напряжения, которая может влиять на переходный процесс. Характер ее был показан на рис. 8.2. Поэтому, пренебрегая ею, мы должны отдавать себе отчет в том, что переходный процесс в цепи с исследуемым сопротивлением может быть оценен только с качественной, но не с количественной стороны. Но и такая оценка представляет определенный интерес.

Впервые расчетная эквивалентная схема сопротивления живой ткани была предложена Дж. Фрике. Затем С. Коль и Г. Кертис предложили ее для нервных и мышечных волокон.

На рис. 8.7 показаны некоторые эквивалентные схемы сопротивления клетки любой живой ткани и организма в целом, предложенные еще в 1928 г. Д. Л. Рубинштейном. Они

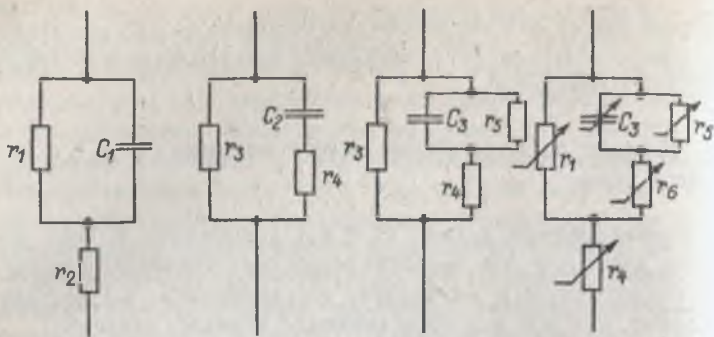


Рис. 8.7. Эквивалентные схемы электрического сопротивления по Д. Л. Рубинштейну

представляют собой различные сочетания параллельно и последовательно соединенных сопротивлений. Некоторые из этих вариантов хорошо воспроизводят зависимость полного сопротивления от частоты. Вариантов эквивалентных электрических схем можно привести множество, и каждый из них в той или иной степени поддается обоснованию.

Рассмотрим, например, вариант, представленный на рис. 8.8 и отличающийся от предыдущих тем, что «сопротивление внутренних органов» заменено эквивалентом, имеющим три отдельных последовательно соединенных сопротивления. Этот вариант показывает наличие существенного различия в удельных сопротивлениях систем, участвующих в канализации электрического тока (мышцы, кровеносные сосуды, нервы). Каждая из систем неравноценна другим с точки зрения жизнеобеспечения человека, неравноценна она и по изменению электропроводности. Представленная на рис. 8.8 схема способствует дифференциальному подходу к изучению электропроводности тела человека. По ней можно четко указать, что определяющими в изменении сопротивле-

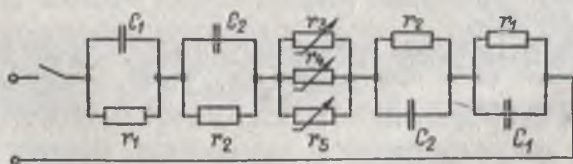


Рис. 8.8. Полная эквивалентная схема электрического сопротивления тела человека по В. Е. Манойлову (элементы цепи — активные)

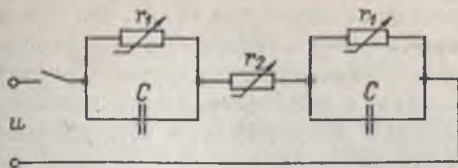


Рис. 8.9. Упрощенная эквивалентная схема

ния являются r_1 и C_1 — параметры эпидермиса, значения которых зависят от влажности, газового состава, температуры и других факторов окружающей среды и от состояния человека. Изменением r_2 объясняется, по-видимому, и изменение сопротивления, характеризующего кожно-гальванический эффект и другие явления. Очевидно, происходят изменения и в «факторе внимания» C_2 . Предложенную эквивалентную схему можно использовать при изучении электропроводности в диагностической и познавательной целях.

Но поскольку численных данных, характеризующих каждый элемент рассмотренной схемы, еще нет, то для выявления качественных изменений в электрической цепи через тело человека в первом приближении пригодна упрощенная схема, показанная на рис. 8.9. Она и была принята нами для изучения переходных процессов при электротравмах. Считалось, что r_1 — активное сопротивление кожи; r_2 — активное суммарное сопротивление внутренних органов; C — емкость кожи между поверхностью электрода и мышечной тканью.

Переходный процесс. Учитывая возможность качественной оценки роли переходных процессов в электрической цепи через тело человека, сделаем следующие допущения:

а) эквивалентную схему будем рассматривать как электрическую цепь с сосредоточенными параметрами;

б) пренебрегаем емкостной составляющей электрического сопротивления внутренних органов;

в) при выводе расчетных выражений параметры эквивалентной схемы принимаем в первом приближении линейными;

г) не учитываем влияния биопотенциалов.

Хотя последнее допущение и сделано, но, вообще говоря, без учета биопотенциалов трудно характеризовать процессы жизнедеятельности. Именно взаимодействие биологических факторов с поражающими параметрами электрической цепи через тело человека во многом обуславливает тяжесть электротравмы и ее исход. В дальнейшем по мере развития биофизических и биохимических исследований качественные по-

казатели переходных процессов будут, без сомнения, дополнены достоверными количественными показателями, но до тех пор электрические эквивалентные схемы приходится рассматривать как схемы не с активными, а с пассивными элементами.

При сделанных допущениях и при условии включения цепи на напряжение вида

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

ток цепи в переходный период определится выражением

$$i(p) = \frac{1}{p} U_m \frac{(p^2 \sin \alpha + p \omega \cos \alpha) (pCr_1 + 1)}{(p^2 + \omega^2) (pCr_1 r_2 + 2r_1 + r_2)} = \\ = \frac{1}{p} U_m \frac{M(p)}{N(p)},$$

откуда

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \frac{M(p_1)}{pN'(p_1)} e^{p_1 t},$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{Z}; \quad Z = \sqrt{\left[r_2 + \frac{2r_1}{1 + (r_1 \omega C)^2} \right]^2 + \left[\frac{2r_1^2 \omega C}{1 + (r_1 \omega C)^2} \right]^2}; \\ \operatorname{tg} \varphi = - \frac{2r_1^2 \omega C}{2r_1 + r_2 [1 + (r_1 \omega C)^2]}; \quad p_1 = - \frac{2r_1 + r_2}{Cr_1 r_2}.$$

Последующие экспериментальные исследования дали возможность оценить численные значения r и C . Опыты состояли в определении значения тока и угла сдвига между током и приложенным к электродам напряжением, которое в опытах с людьми не превышало 2—3 В. Electroды накладывались непосредственно на тело. Измерения проводились при синусоидальном напряжении промышленной частоты. Следует заметить, что при измерениях на таком напряжении полученные величины оказываются заведомо больше соответствующих напряжению 120 и 220 В. Но с этим приходится мириться, поскольку другого метода оценки величин r и C до сих пор нет.

Проведенные измерения показали, что угол φ находится в пределах 18—45°. Это позволило для оценки C , представляющего собой некоторую величину, эквивалентную емкости, применить выражение

$$C = \frac{2\tau (1 - \omega\tau \operatorname{ctg} \varphi)}{r_2 [1 + (A - \operatorname{ctg} \varphi)^2]},$$

где $A = \omega\tau + \operatorname{ctg} \varphi$; τ — постоянная времени затухания.

Переходный процесс в электрической цепи через тело человека удалось проверить для малых значений напряжений осциллографированием (схема опыта показана на рис. 8.10). Если же напряжения велики, то экспериментальные кривые переходных процессов, как показано в работах Х. Швана и Г. Пирсоля, резко отличаются от расчетных кривых. Причина состоит в том, что на переходные процессы накладываются явления, сходные с пробоем изоляции.

Интересное исследование проведено И. Н. Кротковым в НПО «Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева». Он впервые получил значение угла потерь $\operatorname{tg} \Delta$ для электрического сопротивления на частоте 10^3 Гц; оно оказалось в пределах 0,15—0,60, что не противоречит результатам наших исследований и свидетельствует о большом разбросе емкостного и активного сопротивлений кожи человека. Возможно, это является началом нового диагностического направления в медицине и подведет базу под перспективные работы Б. М. Ворошилова, посвященные выявлению значения электроэпидермального сопротивления как отражения внутреннего состояния организма человека.

В ходе эксперимента установившиеся значения осязательного напряжения и осязательного тока, полученные при постепенном подъеме напряжения в безопасных пределах, были сравнены с установившимися значениями напряжения и тока переходного процесса, вызывающего пороговое раздражение, после чего для этих реальных условий была проверена эквивалентная схема. Оказалось, что последние значения намного меньше первых и зависят от индуктивного сопротивления, последовательно включенного в цепь с человеком.

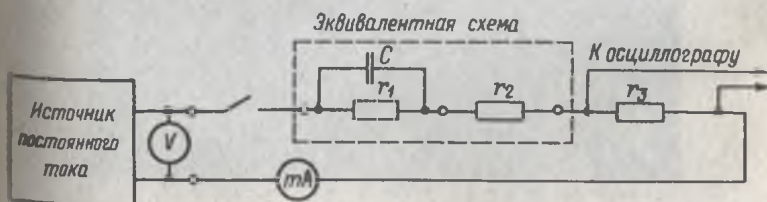


Рис. 8.10. Схема измерения переходного процесса

казатели переходных процессов будут, без сомнения, дополнены достоверными количественными показателями, но до тех пор электрические эквивалентные схемы приходится рассматривать как схемы не с активными, а с пассивными элементами.

При сделанных допущениях и при условии включения цепи на напряжение вида

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

ток цепи в переходный период определится выражением

$$i(p) = \frac{1}{p} U_m \frac{(p^2 \sin \alpha + p \omega \cos \alpha) (p C r_1 + 1)}{(p^2 + \omega^2) (p C r_1 r_2 + 2r_1 + r_2)} = \\ = \frac{1}{p} U_m \frac{M(p)}{N(p)},$$

откуда

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \frac{M(p_1)}{p N'(p_1)} e^{p_1 t},$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{Z}; \quad Z = \sqrt{\left[r_2 + \frac{2r_1}{1 + (r_1 \omega C)^2} \right]^2 + \left[\frac{2r_1^2 \omega C}{1 + (r_1 \omega C)^2} \right]^2}; \\ \operatorname{tg} \varphi = - \frac{2r_1^2 \omega C}{2r_1 + r_2 [1 + (r_1 \omega C)^2]}; \quad p_1 = - \frac{2r_1 + r_2}{C r_1 r_2}.$$

Последующие экспериментальные исследования дали возможность оценить численные значения r и C . Опыты состояли в определении значения тока и угла сдвига между током и приложенным к электродам напряжением, которое в опытах с людьми не превышало 2—3 В. Electroды накладывались непосредственно на тело. Измерения проводились при синусоидальном напряжении промышленной частоты. Следует заметить, что при измерениях на таком напряжении полученные величины оказываются заведомо больше соответствующих напряжению 120 и 220 В. Но с этим приходится мириться, поскольку другого метода оценки величин r и C до сих пор нет.

Проведенные измерения показали, что угол φ находится в пределах 18—45°. Это позволило для оценки C , представляющего собой некоторую величину, эквивалентную емкости, применить выражение

$$C = \frac{2\tau (1 - \omega\tau \operatorname{ctg} \varphi)}{r_2 [1 + (A - \operatorname{ctg} \varphi)^2]},$$

где $A = \omega\tau + \operatorname{ctg} \varphi$; τ — постоянная времени затухания.

Переходный процесс в электрической цепи через тело человека удалось проверить для малых значений напряжений осциллографированием (схема опыта показана на рис. 8.10). Если же напряжения велики, то экспериментальные кривые переходных процессов, как показано в работах Х. Швана и Г. Пирсоля, резко отличаются от расчетных кривых. Причина состоит в том, что на переходные процессы накладываются явления, сходные с пробоем изоляции.

Интересное исследование проведено И. Н. Кротковым в НПО «Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева». Он впервые получил значение угла потерь $\operatorname{tg} \Delta$ для электрического сопротивления на частоте 10^3 Гц; оно оказалось в пределах 0,15—0,60, что не противоречит результатам наших исследований и свидетельствует о большом разбросе емкостного и активного сопротивлений кожи человека. Возможно, это является началом нового диагностического направления в медицине и подведет базу под перспективные работы Б. М. Ворошилова, посвященные выявлению значения электроэпидермального сопротивления как отражения внутреннего состояния организма человека.

В ходе эксперимента установившиеся значения ощутимого напряжения и ощутимого тока, полученные при постепенном подъеме напряжения в безопасных пределах, были сравнены с установившимися значениями напряжения и тока переходного процесса, вызывающего пороговое раздражение, после чего для этих реальных условий была проверена эквивалентная схема. Оказалось, что последние значения намного меньше первых и зависят от индуктивного сопротивления, последовательно включенного в цепь с человеком.

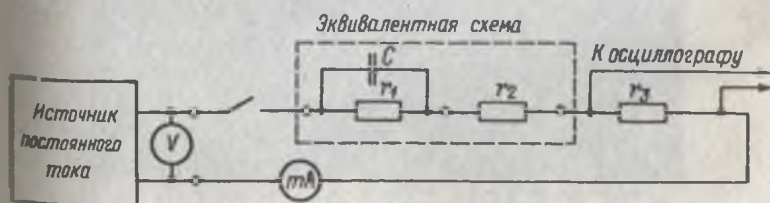


Рис. 8.10. Схема измерения переходного процесса

Численное значение τ получено из осциллограммы переходного процесса (рис. 8.11). Среднее значение $\tau = 42 \cdot 10^{-6}$ с. Отсюда $C = 0,0425 \cdot 10^{-6}$ Ф, что соответствует $\epsilon_a = 95\epsilon_0$.

Установленные нами численные значения ϵ совпадают с данными Х. Швана и Г. Пирсоля и ряда других отечественных и зарубежных авторов, опубликованными уже после завершения нами описываемых исследований.

Зная τ , можно определить r_1 :

$$r_1 = \frac{-r_2 [1 + (A - \operatorname{ctg} \varphi)^2]}{2\varphi\tau A},$$

в среднем $r_1 = 4,38 \cdot 10^4$ Ом.

Полученные численные значения параметров эквивалентной схемы дали возможность рассчитать ток переходного режима при напряжении

$$u(t) = 12 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha).$$

Для получения наибольшего броска тока угол α принят равным 90° .

Численное значение тока можно найти из расчетного выражения

$$i(t) = 0,23 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 120^\circ) + 34 \cdot 10^{-3} e^{-93100 t},$$

экспериментальное же исследование дало

$$i(t) = 2,6 \cdot 10^{-3} \sin(\omega t + 120^\circ) + 40 \cdot 10^{-3} e^{-23500 t}.$$

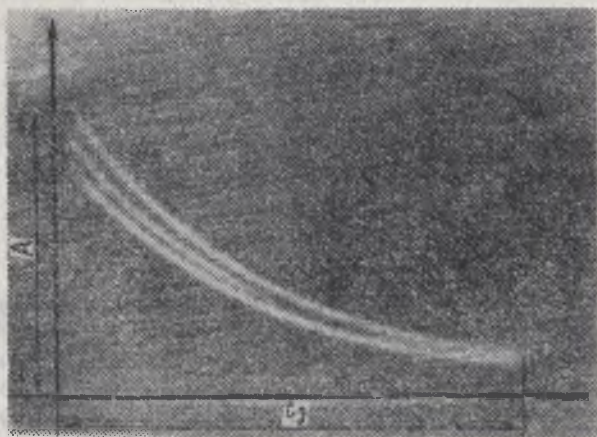


Рис. 8.11. Осциллограмма переходного процесса
 t_3 — полное время (затухание) переходного процесса

Сопоставление приведенных выражений показывает достаточное совпадение свободных членов и почти десятикратное расхождение «вынужденных» составляющих.

Такого расхождения и следовало ожидать в связи с принятым допущением о линейности системы. Нелинейность системы проявилась не в переходный период (об этом свидетельствует совпадение численных значений свободных членов), а за его пределами.

Рассмотрим цепь на переменном токе, когда последовательно с телом человека включено сопротивление, обладающее индуктивностью L .

Начальные условия (при прежних обозначениях) можно записать так:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha); \quad \bar{u}(p) = U_m \frac{\omega \cos \alpha + p \sin \alpha}{p^2 + \omega^2},$$

$$Z(p) = Z_1(p) + \frac{Z_2(p) Z_3(p)}{Z_2(p) + Z_3(p)}; \quad i(p) = \frac{\bar{u}(p)}{Z(p)};$$

$$\bar{i}(p) = \frac{1}{p} U_m \frac{p(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha)(p r_1 C + 1)}{(p^2 + \omega^2)[p_1^2 r_1 L C + p_2(r_1 R C + L) + r_1 + R]}.$$

Решая, находим

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + A e^{p_3 t} + B e^{p_4 t},$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{Z}; \quad Z = \text{mod} \left(\frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_2 + Z_3} \right);$$

$$Z_1 = R + j\omega L; \quad Z_2 = r_1; \quad Z_3 = \frac{1}{j\omega C}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{b}{a};$$

$$a = RC \left(\frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_2 + Z_3} \right); \quad b = I_m \left(\frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_2 + Z_3} \right);$$

$$A = \frac{U_m (p_3 \sin \alpha + \omega \cos \alpha) (p_3 r C + 1)}{p_3 \cdot 2[p_3^2 r L C + p_3 (r R C + L) + r + R] + \rightarrow \rightarrow + (p_3^2 + \omega^2) (p_3 \cdot 2r L C + r R C + L)}$$

$$B = \frac{U_m (p_4 \sin \alpha + \omega \cos \alpha) (p_4 r C + 1)}{p_4 \cdot 2[p_4^2 r L C + p_4 (r R C + L) + r + R] + \rightarrow \rightarrow + (p_4^2 + \omega^2) (p_4 \cdot 2r L C + r R C + L)}$$

$$p_1 = -j\omega; \quad p_2 = j\omega;$$

$$p_{3,4} = -\frac{rRC+L}{2rLC} \pm \sqrt{\left(\frac{rRC+L}{2rLC}\right)^2 - \frac{r+R}{rLC}}.$$

Полученные аналитические выражения полного электрического сопротивления тела человека расширяют возможности изучения электрической цепи через тело человека и уже сейчас находят применение, о чем свидетельствует хотя бы работа И. Э. Бацеливича и И. Ф. Сидорова [8]. По мере накопления данных появится возможность использовать и более сложную схему (см. рис. 8.8). Но тогда потребуются иные выражения для расчета, вывести которые не представляет труда.

Глава девятая

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ТЯЖЕСТЬ ИСХОДА ЭЛЕКТРОТРАВМЫ

9.1. Предыстория нормирования безопасных значений напряжения и тока

Издавна повелось утверждать, что только два параметра — напряжение и ток — определяют исход электротравмы. Между тем жизнь опровергает это. Достаточно расчесать волосы неметаллической гребенкой, а затем приложить ее к клочкам бумаги, как последние притянутся и прилипнут к ней. Измерив возникшее напряжение с помощью вольтметра с большим внутренним сопротивлением, убедимся, что напряжение на гребенке по отношению к заземленным и незаземленным предметам окажется равным десятку киловольт. Опасности для человека такое напряжение в описанном случае не представляет. Сняв с себя белье из синтетического материала, вы легко убедитесь в том, что оно «искрит». Электрическое напряжение достигает здесь киловольт. И опять-таки оно не угрожает человеку. А вот напряжение тех же значений в обычной телевизионной трубке уже опасно. Прикосновение руки к токоведущим частям телевизора в процессе

его ремонта неоднократно приводило к смертельным исходам. Отсюда вывод: само по себе напряжение не обуславливает тяжести исхода.

Выходит, виновник — ток? Но из описаний электротравм с тяжелым исходом и из иллюстраций, приведенных в пятой главе, явствует, что даже ток в несколько ампер, прошедший через тело человека, непосредственно не приводил к гибели последнего; больше того, во многих случаях даже после тяжелых травм удавалось в результате активного лечения сохранить пострадавшему трудоспособность. Такие травмы и такие исходы имели место при напряжении от 50 В до 35 кВ. В тех случаях, когда прохождение «большого» тока сопровождалось дугой, тяжесть исхода во многом предопределялась температурой пламени электрической дуги, т. е. вышлась совместным действием температуры и тока.

Не признав единственным виновником смерти от электричества ни напряжение, ни ток, мы должны задуматься над тем, не зависит ли исход поражения от времени, в течение которого существовала электрическая цепь через тело человека, и, стало быть, от энергии, поглощенной живым организмом. Анализ электротравм и результаты опытов на животных дают на этот вопрос ответ: да, в какой-то мере зависит. Но именно «в какой-то мере», ибо выяснилось, что линейной зависимости между поглощенной энергией и тяжестью поражения тоже не существует. Иногда наблюдались электротравмы, заканчивавшиеся летально при крайне коротком времени существования электрической цепи через тело человека. При таких «электротравмах проноса» энергия, поглощенная телом пострадавшего, очень мала. В то же время отмечены случаи, когда поглощенная энергия, равная киловатт-часам, не сопровождалась смертельным исходом.

Все сказанное служит еще одним доказательством огромного значения в исходе электротравмы биофизических особенностей электрического сопротивления тела человека — особенностей, только частично присущих телу животного. Ранее было достаточно четко показано, что эту специфику исхода поражения человека обуславливает главным образом его центральная нервная система, точнее, органы управления основными, жизненно важными функциями человека. Эти зависимости пока еще полностью не поддаются моделированию. Нужны, конечно, и дальнейшие наблюдения за травмированными электричеством людьми, и новые опыты на животных, но, главное, что нужно, это — продолжение глубокого и всестороннего анализа электротравм. Такой анализ архисложен, однако только он обеспечит окончательное науч-

но обоснованное нормирование безопасных значений рассматриваемых параметров — напряжения, тока и времени существования цепи через тело человека, ибо именно они пока являются основой технической разработки защитных мероприятий.

Возникает вопрос: нужно ли уже сегодня нормировать эти параметры на столь пока еще недостаточно научно аргументированной основе? Чтобы ответить на этот вопрос, надо вернуться в прошлое.

Начало нормированию опасного и безопасного значений напряжения было положено в 80-х годах XIX века — в эпоху становления научной метрологии. Побудительной причиной нормирования опасных и безопасных токов явилось тогда создание электрического стула в США, а несколько позже — несовершенство изоляционных материалов, предопределившее необходимость установления минимальных требований к ним. Именно тогда в мероприятия по технике безопасности было введено в качестве основы сакраментальное значение 100 мА. Это значение (о нем неоднократно упоминалось) было сочтено пороговым опасным значением тока через тело человека. Многочисленные опыты на животных должны были, казалось, поколебать этот вывод, но сторонники названного порогового опасного значения тока получили поддержку в классическом исследовании Л. Ферриса и др. [94]. В этой работе, о которой уже упоминалось, было показано на опытах с тысячами самых разных животных, что смертельный исход наступает за пределами указанного тока, а следовательно, он и должен быть основой нормирования тока.

Недостаточно критическое отношение к выводам, сделанным в этом исследовании, привело к неправильному развитию основ электробезопасности. Постараемся показать это на простом, но достаточно убедительном примере. Человека, предложившего для всех лиц, страдающих различными недостатками зрения, выпускать очки одного и того же оптического параметра, посчитали бы в лучшем случае невеждой, ибо рецептура очков предусматривает сотни различных вариантов оптических параметров. Почему же для такого сложного раздражителя нервной системы человека, как электрический ток, устанавливают единое пороговое значение или в лучшем случае шесть его подвидов, как это делается в ГОСТ 12.1.009—76, а именно фибрилляционный ток, пороговый ощутимый ток, пороговый неотпускающий ток, пороговый фибрилляционный ток, ощутимый ток и неотпускающий ток? И это на миллионы вариантов по каждому из этих токов!

Примерно то же относится и к нормированию напряжений. Классификация охранительных мероприятий по значениям напряжения, несомненно, нужна, но в основу такой классификации должны быть положены физиологические и биологические параметры, обуславливающие исход поражения и технически обеспечиваемые надежностью оборудования.

9.2. Напряжение

Исходные позиции. По сложившейся традиции в книгах, посвященных электробезопасности, сначала характеризуются физические параметры, обуславливающие исход поражения, а уже затем описывается сама электротравма, излагаются сведения о природе электрического сопротивления тела человека и приводятся данные о других сопротивлениях, оказавшихся включенными в цепь последовательно с телом человека.

Мы же построили эту книгу, как, вероятно, уже заметил читатель, совершенно по-иному: прежде всего попытались всесторонне охарактеризовать электротравму, а потом описали особенности электрического сопротивления тела человека. Твердо став на позиции понимания электротравмы как многообразного явления, приступаем теперь к оценке значений главных физических параметров поражающей электрической цепи, тем самым как бы делая заявку на пересмотр распространенного в мировой литературе одностороннего подхода к оценке этих параметров.

Начнем с напряжения, поскольку для обсуждаемого вопроса этот параметр является важнейшим. Ведь именно напряжение, приложенное к любой электрической цепи, приводит к преобразованию электрических явлений в другие явления, воздействие которых на организм человека и вызывает непосредственно тот или иной исход поражения. К тому же напряжение — весьма удобный параметр для нормирования требований электробезопасности.

Поражающее напряжение. На протяжении десятилетий считалось, что исход поражения электрическим током зависит от напряжения сети (установки): чем выше это напряжение, тем тяжелее последствия электротравмы. Учет электротравм ведется с подразделением по значениям напряжения сети (установки). По этому же признаку строится классификация электротравм, анализируются статистические данные о них и проводятся эксперименты на животных. Между тем такое изучение электротравм далеко не всегда дает правильное представление об этом поражающем факторе. Приведенное в § 3.1 распределение электротравм по напряжению устано-

вок, на которых они произошли, доказало наличие смертельных поражений при малом напряжении сети (установки) и несмертельных — при высоком. Напомним, что, по нашим данным, согласующимся с данными ВНИИ охраны труда ВЦСПС (г. Ленинград), ежегодно происходит 26—38 поражений в сетях (установках) напряжением 65 В и ниже. Далее, в § 5.1 было показано, что лишь в относительно редких случаях двухполюсного прикосновения поражающее напряжение равно напряжению сети (установки). Во всех иных случаях оно меньше, а иногда и значительно меньше его. Нечего говорить о том, насколько это затрудняет проведение экспериментов на моделях. Эти и другие вопросы, касающиеся напряжения как одного из параметров, определяющих исход электротравм, и будут подробно рассмотрены в настоящем параграфе.

Начиная с 1936 г. [39], нами систематически проводились инструментальные определения поражающего напряжения при расследовании причин несчастных случаев и составлении экспертных заключений. Методика расследования и сопутствующих измерений описана в § 5.1 и в работе [42]. На протяжении ряда лет нами было изучено 36 случаев со смертельным исходом и 63 с временной потерей трудоспособности. 4 % этих несчастных случаев произошли в сетях напряжением ниже 127 В, 22 % — в сетях напряжением 127 В, 63 % — в сетях напряжением 220 В и 11 % — в сетях напряжением выше 220 В.

Обратимся к электрическим ударам. О них подробно говорилось в § 5.5. Здесь сопоставим лишь вызвавшие их напряжения с напряжениями, приведшими к летальным исходам. Если на поражающее напряжение ниже 100 В (подчеркнем, именно поражающее напряжение, а не напряжение сети) приходилось около 30 % смертельных поражений, то электрические удары при этом напряжении составили лишь 20,6 %. Объяснить этот парадокс можно лишь тем, что электрические удары при напряжении ниже 50 В весьма незначительны по эффекту и поэтому не регистрировались рабочими даже при специальном изучении. Если сделать поправку на этот психологический фактор, то можно с достаточным основанием считать, что процент поражений со смертельным исходом при напряжении 100 В и ниже равен проценту электрических ударов, возникших при напряжениях, лежащих в тех же границах. Важное обстоятельство! Одно и то же напряжение (и притом малое) в одних случаях вызывает тяжелый исход, в других приводит лишь к электрическому удару или, как правильнее называет его П. Осипка, к электрическому раз-

дражению (электризации). Материал двух предыдущих глав подготавливает читателя к такому выводу.

Электрическая цепь, возникшая через уязвимые к току места на теле человека, вызывает также при напряжениях всего в несколько вольт болезненные ощущения, а иногда и потерю сознания. Для понимания механизма поражающего действия существенны результаты наших опытов, во время которых испытуемые держали в руках электроды с поверхностью 60—100 см². Было установлено, что напряжение, вызывающее появление ощутимого тока (при частоте 50 Гц), находится в пределах 3—30 В. Испытуемые безошибочно отличали раздражение, вызванное переменным током, от раздражения, вызванного постоянным током.

Таким образом, напряжения, вызывающие раздражение, практически совпадают с напряжениями, при которых возникают болезненные ощущения в теле человека, когда цепь проходит через уязвимые к току места на теле.

Приведенные в § 3.1 данные статистического анализа электротравм показали, что непосредственно в сетях напряжением 65 В и ниже ежегодно регистрируются лишь в нашей стране десятки несчастных случаев со смертельным исходом. Эти данные имеют весьма важное значение для установления критерия опасности. Вот почему на определение поражающих напряжений в сетях напряжением 65 В и ниже было обращено особое внимание. В каждом отдельном случае полученные результаты весьма подробно и тщательно изучались комиссией специалистов. Проводились многочисленные измерения, причем в первую очередь выяснялась возможность перехода напряжения из сети выше 1000 В в сеть ниже 1000 В (пробой обмоток понижающего трансформатора), и только тогда, когда факт гибели людей при малом напряжении оказывался бесспорным, давалось соответствующее заключение. Примеры того, как это делалось, были даны в § 5.2.

Несомненный интерес представляют результаты определения поражающих напряжений в сетях ниже 1000 В при однополюсных замыканиях. Оказалось, что 24 несчастных случая со смертельным исходом (из общего числа изученных 223) произошли при поражающем напряжении ниже 50 В, в том числе 19 — при напряжении 36 В и 5 — при напряжении ниже 36 В.

Заслуживают внимания и данные противоположного характера, а именно благополучные исходы при поражении электрическим током напряжением выше 1000 В. Установлено, что в момент поражения напряжениями 6; 10; 35 и 68 кВ смерть иногда не наступала; более того, в ряде случаев к по-

страдавшему даже возвращалась полная трудоспособность. Это же утверждают и другие авторы, в том числе П. Осипка и Л. Киллингер. Объективности ради заметим, однако, что бывали случаи, когда лица, казалось бы, благополучно перенесшие электротравму при напряжении в несколько киловольт, через немалое число лет после происшествия умирали. Диагноз гласил: «Сердечная недостаточность», хотя причина ее оставалась врачам неясной. Можно предположить, что вероятной причиной смерти в таких случаях являются отдаленные последствия перенесенной электротравмы. Один из таких случаев был подробно описан в примере 6.3.

Но тот факт, что смертельным исходам при малом напряжении противостоят случаи выживания при поражениях напряжением в несколько киловольт, не должен нас смущать. Эту противоречивость исходов можно в известной степени объяснить, если при анализе параметров электрической цепи, вызвавшей ту или иную реакцию, исходить из состояния электрического (точнее, электромагнитного) поля. В этом случае наиболее характерным параметром становится не напряжение между электродами, а максимальная напряженность поля.

Напряженность поля. Если сформулированное выше положение справедливо, то при постоянном значении напряжения на электродах или при постоянном значении тока раздражающее действие должно изменяться с изменением расстояния между электродами, наложенными на тело, и зависеть от их конфигурации. Напряжение и ток сохраняют постоянные значения потому, что сопротивление электрической цепи обусловлено сопротивлением контактных соединений «электрод — поверхность кожи», которые при одинаковой поверхности электродов практически не меняется. Что касается сопротивлений мышечной ткани, кровеносной системы и т. п., то они меняются с изменением расстояния между электродами, но численные значения их относительно невелики, и эти изменения на общее сопротивление цепи влияют мало.

Для проверки того, зависит ли реакция организма на электрический ток от напряженности поля, были измерены значения пороговых ощутимых токов при плоских и круглых браслетообразных электродах, наложенных на руку испытуемого. К электродам подвели провода от источника тока промышленной частоты и определяли значения напряжения и тока, при которых наблюдалось начальное раздражающее действие. Затем расстояние между электродами менялось, и опыт повторялся. Зависимость напряжения, подведенного к электродам, от расстояния между ними приведена на

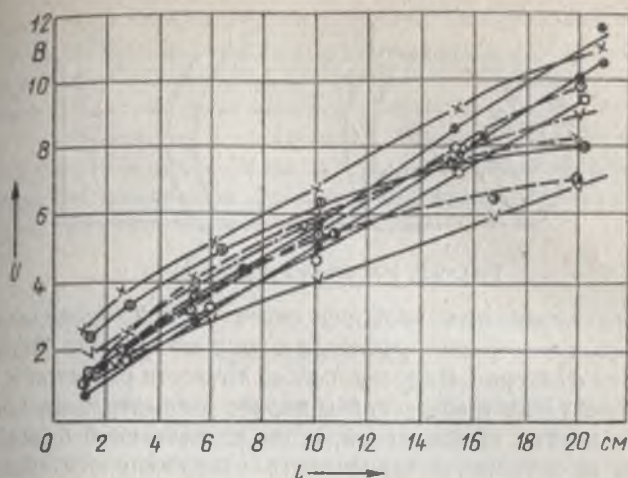


Рис. 9.1. Зависимость ошутимого напряжения U от расстояния L между электродами, наложенными на тело человека

рис. 9.1, из которого видно, что с уменьшением расстояния между электродами уменьшается и значение напряжения, вызывающего раздражение.

Наблюдениям подверглись 22 человека, причем с каждым из них было проделано на протяжении 5—10 дней 10—25 серий измерений. Такое большое число измерений позволяет считать, что результаты их достаточно верно отражают зависимость

$$U = f(L),$$

где L — расстояние между электродами.

Изменение напряженности поля при изменении расстояния между электродами можно в первом приближении определить теоретически. В самом общем виде электрическое поле будет в данном случае полем между двумя браслетообразными электродами, расположенными на многослойном цилиндре общим диаметром D с толщиной внешней стенки ΔD . Цилиндр обладает разной степенью анизотропии по слоям (рис. 9.2). Наружный слой — этой слой кожи, проводимость которой по мере приближения к мышце увеличивается. Внутренний цилиндр — костная ткань.

Напряженность электрического поля такой системы, даже если считать все составляющие постоянными, пока еще не поддается точному расчету, так как не представляется воз-

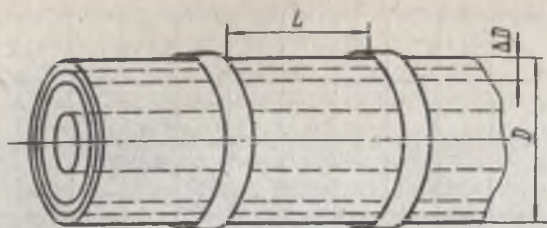


Рис. 9.2. Расчетная модель руки

можно определить толщину слоев разной проводимости и степень анизотропии, учитывая к тому же влияние физиологических факторов. Впрочем, особой точности расчетов в данном случае и не требуется. Мы вправе рассматривать задачу лишь в первом приближении, ставя единственной целью выяснить качественную зависимость напряженности поля от расстояния между электродами, т. е. подчинить эти исследования доказательству обоснованности подхода к определению исходных параметров с точки зрения теории поля. В первом приближении имеющееся сложное поле можно заменить в одном случае полем параллельных цилиндрических проводников одинакового диаметра, в другом — полем с плоскими проводниками. Эти поля поддаются расчету. С изменением расстояния между электродами напряженность поля между ними изменяется и по длине, и в перпендикулярном направлении. Исходя из сказанного, можно определить зависимость напряжения, приложенного к этим электродам, от расстояния между ними в плоскости, перпендикулярной линии, соединяющей их центры:

$$U = \frac{4,6E_p \operatorname{tg}(L/r)La}{1+L},$$

где E_p — напряженность поля, вызывающая раздражение; L — расстояние между электродами; r — радиус провода; a — коэффициент пропорциональности.

Допустимо предположить, что напряженность поля E_p , вызывающая раздражение, является при прочих условиях величиной постоянной. Тогда для цилиндрических электродов можно найти численную зависимость $U = f(L)$.

Распределение напряженности поля, а следовательно, и максимальное значение ее при плоских электродах, имеющих ту же поверхность соприкосновения, будут иными. Чтобы найти опять-таки в первом приближении зависимость $U = f(L)$, можно воспользоваться решением, которое предложили А. В. Нетушил и К. К. Табанос для расчета высокоча-

стотного поля между двумя кольцами прямоугольного сечения, наложенными на цилиндр из изолирующего материала. Если диаметр цилиндра (в рассматриваемом случае — руки) значительно превышает толщину стенок (в рассматриваемом случае — кожи), то электрическое поле в цилиндре (руке) можно считать, как и ранее, условно плоскопараллельным.

Электрическое поле двух разноименных пластин можно описать аналитической формулой

$$Z = r \operatorname{sh} (\omega/A) = x + jy,$$

где $\omega = \psi + j\omega$; при этом потенциал электродов

$$\varphi_1 = \varphi_2 + A(K),$$

где K — модуль эллиптического интеграла, равный r_1/r_2 ; значения r_1 и r_2 показаны на рис. 9.3. Расстояние между точками a и b на этом же рисунке составляет толщину стенок цилиндра.

Учитывая, что в данном случае напряженность поля непосредственно под электродами практически не поддается расчету, сделаем допущение, что она будет изменяться по тому же закону, что и в плоскости, перпендикулярной оси руки и находящейся на одинаковом расстоянии от обоих электродов. Для расчета распределения напряженности поля вдоль оси положим $x=0$ и $\psi=0$. Тогда

$$jy = r_1 \operatorname{sh} (j\omega/A),$$

а напряженность поля, вызывающая раздражение,

$$E_p = \frac{d\psi}{dy} = \frac{A}{\operatorname{sh} (j\omega/A)}.$$

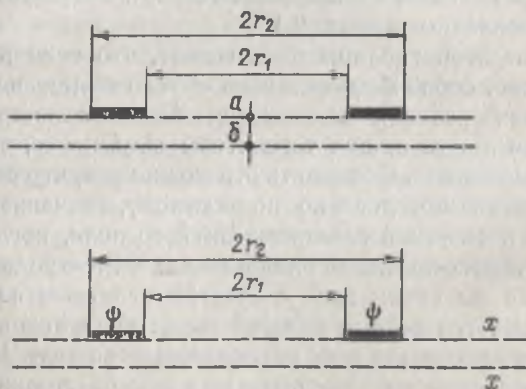


Рис. 9.3. Расчетная схема

Таблица 9.1. Раздражающая реакция в зависимости от расположения электродов

Расположение электродов	Раздражающий фактор					
	Напряжение, В		Ток, мА		Мощность, мВт	
	Пределы значений	Среднее значение	Пределы значений	Среднее значение	Пределы значений	Среднее значение
На одной левой руке	7,1—15,0	10,3	0,20—0,95	0,54	2,4—6,0	4,5
На обеих руках	7,0—19,1	12,5	0,60—1,08	0,78	1,7—9,6	6,9

Учитывая, что A связано с отношениями:

$$\operatorname{sh}(j\psi/A) = \operatorname{ch}(j\psi/A) \operatorname{tg}(j\psi/A);$$

$$\operatorname{ch}(j\psi/A) = \sqrt{1 - \operatorname{ch}^2(j\psi/A)} = \sqrt{1 + y^2/r_1^2};$$

$$\operatorname{tg}(j\psi/A) = \sqrt{1 + K^2 \operatorname{ch}^2(j\psi/A)} = \sqrt{1 + y^2/r_2^2},$$

получаем

$$E_p = \frac{A}{r_1 \sqrt{(1 + y^2/r_1^2)(1 + y^2/r_2^2)}}.$$

В следующей серии опытов сопоставлялись значения осязаемых токов при расположении электродов как на двух руках, так и на одной руке. Измерения по-прежнему производились при токе частотой 50 Гц. Как и ранее, угол сдвига между током и напряжением при одинаковой площади поверхности электродов находился в пределах 14—20°. Результаты исследования показаны в табл. 9.1.

Данные этой таблицы показывают, что если путь тока представляет собой петлю «ладонь — тело — ладонь», то раздражающая реакция вызывается большим напряжением и большим током и, для того чтобы вызвать ее, требуется большая мощность. Объяснить это можно тем, что раздражающее действие обусловлено, по-видимому, значением напряженности и энергией электромагнитного поля, поглощенной в тканях, непосредственно прилегающих к электродам. В данном случае мы имеем дело с электромагнитным полем, ибо рассматривается цепь, в которой начал циркулировать ток.

Форма электродов и их расположение на теле. Наблюдения, проведенные на 16 испытуемых при расстоянии между электродами $L=20$ см, показали, что картина поля зависит

от формы электродов, причем напряженность поля при плоских электродах (под их гранями) больше напряженности поля при цилиндрических электродах.

Но если реакция организма обусловлена напряженностью поля, то не должно ли напряжение, вызывающее раздражение, быть меньше при плоских электродах, чем при цилиндрических? Это предположение нашло свое экспериментальное подтверждение.

Как в расчете, так и в эксперименте напряжение, вызывающее раздражение, менялось при изменении расстояния между электродами. С уменьшением расстояния раздражение наступало при меньших напряжениях.

Полученная зависимость $U=f(L)$ согласуется с данными экспериментальных исследований Д. Н. Насонова и Д. Л. Розенталя [49], Х. Шривера, Б. Брухнера и других по изучению возбудимости одиночных нервов.

Открытие зависимости возбудимости нерва, вызванной электрическим током, от расстояния между электродами принадлежит Л. Кирдо и А. Ложье, которые обнаружили ее еще в 1914 г. Это открытие вызвало большой интерес и послужило предметом широкого обсуждения и специального изучения.

Д. Н. Насонов исследовал зависимость возбудимости ткани от расстояния между электродами на отдельном нерве животного и пришел к убеждению, что «решающим фактором при возникновении возбуждения в нерве является не пороговая сила тока, как это обычно полагают, а пороговое количество энергии, выделяемой током в данный интервал времени». Отсюда он сделал вывод, что само по себе значение тока не характерно для реакции нерва на него.

Исследуя роль энергии при раздражении, Д. Н. Насонов наиболее близко подошел к убедительному объяснению влияния напряженности поля на реакцию живой ткани. Это объяснение заключается в том, что исход поражения при прочих равных условиях определяется энергией электромагнитного поля, поглощенной живой тканью; однако раздражителем, обуславливающим силу этой реакции, служит, по видимому, не вся поглощенная энергия, а лишь та ее часть, которая поглощена нервной тканью, прилегающей к электродам. Значение этой части энергии может изменяться в широких пределах.

Состояние кожи. Доказательством влияния напряженности поля на реакцию организма могут служить результаты наших исследований зависимости между значением ощущаемого напряжения и состоянием поверхности кожи.

Общеизвестно и не подлежит никакому сомнению, что увлажнение кожи резко увеличивает опасность поражения электрическим током. У человека с сухой кожей рук чувствительность к напряжению 127 и даже 220 В иногда полностью отсутствует, но достаточно увлажнить кожу, и болезненным становится прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением всего в несколько вольт.

Как оценить этот феномен с точки зрения теории поля? Правильное объяснение заключается, на наш взгляд, в том, что увлажнение кожи уменьшает сопротивление контакта между ней и электродом. Сравнительная опасность поражения электрическим током человека при влажной и сухой коже в литературе не освещена, поэтому здесь приводятся результаты такого изучения, выполненного автором данной книги. Эти результаты служат лишним доказательством роли напряженности электрического поля при электротравме.

Опыты производились при электродах, зажатых в ладонях или наложенных на наружную поверхность руки. Разное состояние кожи позволило получить раздражающую реакцию при разных напряжениях. В опытах, проведенных при сухой коже рук, для получения раздражающей реакции требовались большие напряжения, но реакция наступала при удельных значениях тока, которые были почти в 10 раз меньше, чем во время опытов с влажными руками. Аналогичные факторы наблюдал еще В Вебер, однако он не придал им должного значения.

Сложность явлений, возникающих при приложении к телу человека электродов (частей оборудования), находящихся под напряжением, приводит к различным реакциям кожи при различной плотности тока у двух электродов. Об этом говорит хотя бы пример электротравмы при электрической цепи «ладонь — ступни ног», представленный на рис. 9.4: на указательном и среднем пальцах — омертвевшая кожа со следом «укуса пчелы»; на ладони, у основания большого пальца (при меньшей плотности тока) — рваная глубокая рана. Подобных вариантов повреждения кожи и тканей достаточно много. Но проверить их на трупах, даже при самом скрупулезном воспроизведении электрической цепи, вызвавшей электротравму, не удастся. Похожей картины не получается.

Чтобы разобраться в причинах рассматриваемого явления, вернемся к описанию строения кожи — этого весьма сложного органа. При увлажнении кожи влага проникает через капилляры эпидермиса. Происходит как бы шунтирование верхнего слоя, в результате чего уменьшается емкость и перераспределяются напряжения. В поверхностном слое



Рис. 9.4. Электротравма при электрической цепи через ладонь человека. Пострадавший остался жив

кожи отмечается большой перепад последних, и периферическая нервная система оказывается под значительным напряжением. При этом меняется и микрофлора кожи.

Форма кривой. Если реакция организма при электротравме зависит от напряженности электромагнитного поля, то сила этой реакции должна зависеть прежде всего от амплитудного, а не от действующего значения напряжения. Наши исследования раздражающего действия электрического тока при несинусоидальном напряжении, проводившиеся по уже описанной в § 8.5 схеме, подтверждают сказанное. Это видно из рис. 9.5, на котором представлены кривые для синусоидального и несинусоидального напряжений.

Аналогичные результаты получены и для разных значений несинусоидальных напряжений. Эти наблюдения были проведены на группе из 22 человек, причем каждый из них находился под наблюдением в течение нескольких дней. При неизменности основных условий наблюдения — площади электродов и состояния кожи — значения ощутимых напряжений и токов у каждого наблюдаемого изменялись в пределах всего 5–8 %.

Следует отметить, что соотношение значений ощутимых напряжений при одном и том же расположении электродов

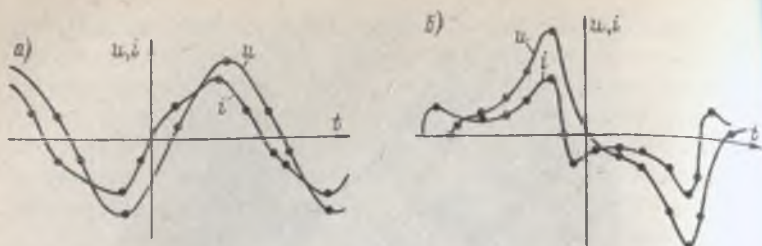


Рис. 9.5. Кривые напряжения и тока в цепи через тело человека при синусоидальном (а) и несинусоидальном (б) напряжении

далеко не одинаково у наблюдаемых: расхождения составляют 150—400 %, причем нижний предел чаще всего наблюдается у тех, которые обладают наибольшей чувствительностью к току.

Постоянное и переменное напряжение. Во всех случаях испытуемые утверждали, что если электроды наложены на плечо или предплечье, то по характеру ощущений (раздражающему действию) напряжение постоянного тока не удастся отличить от напряжения переменного тока: в обоих случаях прохождение тока воспринимается одинаково — как острый болезненный укол.

Если же электроды зажать в руках, то напряжение постоянного тока можно четко отличить от напряжения переменного тока: в первом случае при достижении порогового значения напряжения ощущается покалывание, а во втором случае, при напряжении промышленной частоты (50 Гц), ощущается нечто вроде вибрации. Чтобы вызвать ощущение укола при напряжении постоянного тока, последнее должно быть в 1,5—1,8 раза больше напряжения переменного тока.

О том, что при переменном токе человек реагирует на амплитудное напряжение, автор указывал в своей докторской диссертации еще в 1953 г. К этому же выводу пришел в 1956 г. Ц. Дальзиель, который писал, что при воздействии несинусоидальных токов важны не действующие, а амплитудные значения напряжения.

В свете этих воззрений необходимо внести существенные коррективы в представление об относительной опасности напряжения переменного и постоянного тока. Если смертельный исход возникает через «рефлекторный механизм» и, следовательно, время опасного для человека воздействия электрического тока определяется лишь долями секунды, то различия между действием постоянного и переменного тока практиче-

ски не будет. Сказанное будет справедливым при условии, что поражающее напряжение оценивается не по номинальному напряжению сети, а по амплитудному значению напряжения, которое и сравнивается с напряжением постоянного тока.

Нормирование поражающих напряжений. Доказано, что можно найти объяснение смертельным поражениям, вызванным напряжением 65; 36 и 12 В. Они обусловлены не фибрилляционным механизмом, так как при этих напряжениях даже в самом неблагоприятном случае нельзя получить значение тока, вызывающее фибрилляцию сердечной мышцы человека. Поражения напряжением 65; 36 и 12 В могут привести к смертельному исходу лишь при особых обстоятельствах, например: если электрическая цепь возникает через уязвимые к току места; если отсутствует фактор внимания; если неблагоприятны условия внешней среды и, наконец, если имеется сочетание этих причин. К сказанному можно добавить, что возможны и другие причины смертельного исхода, пока еще недостаточно известные.

Возрастание тяжести исхода поражения с увеличением напряжения (хотя и не в прямой зависимости) приводило в прошлом к выводу о том, что одним из основных мероприятий электробезопасности должно быть снижение значения напряжения (прежде всего для освещения и ручного инструмента). Появился даже термин «напряжение безопасности». Для получения этого напряжения рекомендовалось в помещениях, где существуют условия, неблагоприятные в отношении поражения током, устанавливать понижающие трансформаторы. В разных странах за «напряжения безопасности» принимались напряжения, равные 65; 40; 36; 24 и 12 В. В Советском Союзе для помещений с повышенной влажностью, повышенной температурой и постоянно сниженным атмосферным давлением преимущественное применение нашли напряжения 65, 36 и 12 В.

Однако применять сколь угодно широко (так сказать, без оглядки) пониженные напряжения, на наш взгляд, нецелесообразно.

Начнем с того, что неблагоприятные исходы поражения обусловлены, как правило, не напряжением, под которым оказалась сердечная мышца, особенно если возникший ток недостаточно велик, чтобы вызвать ее фибрилляцию, а следовательно, во многих случаях и смерть. Своей тяжестью электротравма обязана прежде всего, как об этом уже не раз говорилось, нарушению мозгового кровообращения, сопровождающемуся деструкцией центров управления системами дыхания и кровообращения. Подобное нарушение, как прави-

ло, особенно опасно тогда, когда электрическая цепь через тело человека локализуется в акупунктурных зонах, обладающих исключительно высокой чувствительностью к току.

Далее, применение пониженных напряжений обусловливалось в прошлом тем, что вероятность поражения увеличивалась вследствие того, что изоляция оборудования подвергается в сырых и жарких помещениях влияниям, ухудшающим ее параметры. На применение пониженных напряжений шли, несмотря на то, что они усложняют канализацию тока: для передачи той же энергии требуются провода больших сечений, нужны также громоздкие отключающие устройства, менее удобные, чем употребляемые при напряжении, например, 220 В. Особенно это относится к предприятиям по добыче полезных ископаемых, к сетям временного электроснабжения на стройках и т. п.

Но в настоящее время положение существенно изменилось, так как значительно повысилась надежность изоляции проводов и кабелей, а также оборудования. Широко внедряется влагостойкая изоляция, обладающая большим удельным сопротивлением и повышенной электрической прочностью.

Конечно, большое число смертельных поражений в установках напряжением ниже 1000 В, в том числе от 12 до 65 В, не может не тревожить. Никто не перечеркнет и многочисленных наблюдений, согласно которым в перечисленных помещениях с неблагоприятной средой электрическое сопротивление тела человека, его одежды и обуви существенно снижается. Все эти противоречащие друг другу обстоятельства лишают нас возможности сделать категорические выводы. Однако некоторые соображения позволительно все же высказать. Так, правильно было бы вообще отказаться от термина «напряжение безопасности», ибо это — ширма, никого ни от чего не защищающая. Напряжение 12 В целесообразно сохранить, крайне ограничив область его использования (переносные лампы при ремонтах в котельных с агрессивной внешней средой и т. д.).

В помещениях, где по действующим нормативам необходимы напряжения 24 и 36 В, следует допустить напряжения 127; 220 и 380 В, соответственно повысив требования к надежности изготовления, монтажа и эксплуатации сетей и оборудования. От нормирования же напряжений 24 и 36 В вообще следует отказаться, поскольку их применение, судя по результатам расследования электротравм и изучения действия электрического тока в экспериментах на моделях, ничем не обосновано.

Встречаются, правда, такие условия окружающей среды, в которых приходится осуществлять защитные мероприятия, используя напряжения даже ниже 12 В. Но рассчитывать во всех случаях «защиту» по напряжению 12 В — это значит проектировать заведомо дорогостоящие, практически трудно-реализуемые устройства. Нужны разумные решения, пусть и не полностью обоснованные сегодня данными науки. Речь идет прежде всего о заземляющих устройствах в установках напряжением выше 1000 В и в линиях связи. Нам представляется, что расчет заземлений по напряжению прикосновения и напряжению шага целесообразен. В качестве расчетного значения можно рекомендовать значение напряжения прикосновения 150 В при времени действия менее 2 с. Те же рекомендации сохраняются и для напряжения шага. Рекомендации сделаны с учетом того, что а) подстанции обслуживаются лицами электропрофессий; б) возможность возникновения электрической цепи через тело человека ограничена, в) обслуживающий персонал снабжен защитной обувью и в процессе рабочих операций обязан применять другие защитные средства. О том, как это практически реализуется, будет сказано в § 14.3 и 14.4. Эти же значения пригодны и для расчета защиты персонала линий связи от наведенных напряжений. Аргументация остается прежней.

9.3. Электрический ток

Численные значения тока. Авторы многих монографических и статейных публикаций, ориентируясь на пороговое значение смертельного тока 100 мА и выше, называют весьма противоречивые данные о параметрах, при которых наблюдаемые начинают: а) испытывать болезненные ощущения (ощутимый ток), б) могут вытерпеть это раздражение (отпускающий ток) и в) не могут разжать ладони, оказавшиеся в электрической цепи (неотпускающий ток).

С. Кёппен, рассматривая это, разделяет переменные токи на четыре предела: до 25 мА, 25—80 мА, 80 мА — 3 А, 3—8 А.

Если проанализировать эту градацию, то можно увидеть, что 100 мА как безусловно смертельное значение С. Кёппен под сомнение не ставит, хотя это и противоречит фактам, приведенным в его же монографии. Фактор внимания С. Кёппен не учитывает. С позиции этой классификации С. Кёппен анализирует и многие встретившиеся ему случаи электрических поражений. Классификацию С. Кёппена признают многие зарубежные ученые, занимающиеся электробезопасно-

стью, в том числе П. Осипка, Д. Шефер, Ланг, Шнейдер, Шварц, Дж. Купфер и др. По существу, мнение С. Кёппена разделяют и многие отечественные специалисты, например А. П. Киселев, Н. Л. Гурвич, Р. Н. Карякин и С. П. Власов.

Значение 100 мА встречается и в обязательной технической документации — правилах, инструкциях. Его знают все те, кто когда-либо сталкивался с эксплуатацией электрооборудования и электрических сетей. Трудно возражать, но возражать приходится. К этому побуждают нас итоги проводившегося нами на протяжении многих лет изучения электротравм. К этому побуждает нас и уверенность в правоте суждений С. Еллинека, решительно протестовавшего уже много лет назад против попыток признавать во всем диапазоне напряжений только линейную зависимость исхода поражений от значения тока. Но перейдем к обоснованию наших возражений.

Нетрудно заметить, что С. Кёппен и другие, вводя некоторый порядок в обсуждаемый вопрос, не учитывают параметра времени, а это значит, что опасность того или иного значения тока дается вне всякой зависимости от длительности его воздействия.

Начнем с элементарного дидактического сравнения с обычными проводниками. Если спросить любого инженера, техника-электрика или даже монтера, опасен ли для провода ток 100 мА, то ответ будет гласить: чтобы оценить опасность для провода того или иного тока, надо знать сечение провода, его материал, свойства изоляции, условия прокладки, условия среды и, наконец, время, в течение которого ток будет протекать по этому проводу. Только зная все это, можно оценить опасность данного тока для того или иного материала, пусть даже это будет простейший однородный металлический проводник. Как видно, само по себе значение тока 100 мА ничего еще не говорит о его опасности для проводника. Такое же сопоставление можно было бы сделать и с проводником, имеющим не электронную, а ионную проводимость, т. е. с электролитом. Абстрагированное значение тока никак не может характеризовать реакцию на него.

Но если сказанное справедливо для металла или жидкости, то оно вдвойне справедливо для тела человека. Как это ни парадоксально, однако до сих пор на это не обращалось внимания. О степени опасности, грозящей сложнейшему из сложнейших объектов — живому организму, оказавшемуся в электрической цепи, судят лишь по значениям тока и напряжения и по ним одним нормируют защитные мероприятия.

Подобное положение возникло вследствие резкой разобщенности широкого круга электриков и физиков с физиологами и патофизиологами, что достаточно убедительно показано Г. Л. Френкелем [75].

Продолжим начатую аналогию. Разрушение обычного проводника может быть вызвано: а) перегоранием; б) разрывом вследствие электродинамических усилий; в) окислением контактов и т. д. Смертельный исход для человека, вызванный электрическим током, может быть обусловлен: а) фибрилляцией, возникшей при непосредственном протекании тока достаточного значения через сердечную мышцу или иным путем; б) остановкой дыхания, возникшей также вследствие различных причин; в) шоком.

Каждый вид «разрушения» связывается со значением тока, зависящим от условий образования электрической цепи и от времени его протекания. Как известно, проводник (или система проводников) подвергается проверке отдельно на термическую, отдельно на электродинамическую устойчивость и т. п. К человеку же, да и к любому живому организму до сих пор не применялось подобной дифференцированной оценки. А из того обстоятельства, что значение тока не связывают с той или иной причиной смертельного исхода, логически вытекает (хотя в литературе об этом прямо и не говорится), что один и тот же ток может вызвать и фибрилляцию, и остановку дыхания, и шок.

Конечно, можно было бы, продолжая аналогию, характеризовать и оценивать опасность возникновения электрической цепи через тело человека по одному значению тока, как это делается иногда для обычных проводников. Но для этого нужно было бы предварительно доказать, что данное значение тока вполне достаточно (или явно недостаточно) для тех или иных видов разрушения, т. е. уметь предсказать исход по худшему или лучшему варианту.

Деление пораженных на «синих» и «красных». Для человека и животного определено значение тока, вызывающего фибрилляцию, но имеется очень мало данных, характеризующих значение тока и условия, которые вызывают остановку дыхания или шок при внезапном образовании электрической цепи. Напомним, что к 1935 г., когда М. Стассен начал делить смертельно пораженных электрическим током на «синих» и «красных» (см. § 6.6), значение 100 мА уже прочно вошло в литературу в качестве мерила опасного тока. Казалось бы, что это деление пораженных на «синих» и «красных» должно было возбудить интерес к изучению значения тока, вызывающего остановку дыхания.

Но этого не произошло. Дальнейшие исследования были направлены на выявление параметров, характеризующих поражение от фибрилляции, и не касались определения пороговых значений тока, вызывающих шок или остановку дыхания.

Объясняется это тем, что током 100 мА практически можно было вызвать так или иначе, отдельно или вместе, на одном или на разных видах животных все три поражения. Только анализ несчастных случаев с людьми при малых напряжениях заставил обратить внимание на изучение пороговых, смертельно поражающих токов при остановке дыхания и шоке.

Если использовать значения поражающих напряжений, полученные в результате изучения несчастных случаев (см. § 9.2), и данные о значениях сопротивления электрической цепи через тело человека (см. § 8.4), то можно оценить значения поражающих токов. Конечно, такая оценка будет ориентировочной, но все-таки более обоснованной, нежели оценки, выдвинутые С. Кёппеном, Р. Эйхлером и другими, которые при расследовании мало прибегали к моделированию поражения и к экспериментальному определению сопротивлений, вошедших в электрическую цепь при поражении человека. Значения поражающего переменного тока, полученные нами по результатам инструментального изучения несчастных случаев, оказались следующими: из 100 % исследованных поражений 18 % произошли при токах до 5 мА, 24 % — при 5—10 мА, 32 % — при 11—20 мА, 26 % — при токах 21 мА и выше.

Определение значений поражающих токов при поражениях напряжением выше 1000 В не менее сложно. У пострадавшего могут быть тяжелейшие ожоги, хотя в момент поражения он и остался жив. Электрическое сопротивление тела человека в этих случаях колеблется еще более широко. Поэтому речь может идти только об установлении пределов значений этих токов.

Уточнить значения поражающих токов удалось лишь в тех случаях, когда имелись показания регистрирующих приборов и приборов, указывающих появление «земли» в сети.

Для пяти поражений значение тока, возникшего в цепи через тело человека, удалось установить по значениям тока сигнала замыкания и тока действия защитного заземления, поскольку в этих случаях прикосновение человека к токоведущим частям не сопровождалось шунтирующим перекрытием дуги.

Из этих пяти случаев два произошли при напряжении 6,6 кВ, два — при напряжении 11 кВ и один — при напряже-

нии 35 кВ. Приборы контроля замыкания были включены через трансформаторы напряжения. Для того чтобы сигнал замыкания появился, требуется, как известно, ток замыкания не менее 5—6 А; фактически же этот ток в большинстве случаев был больше. Следовательно, если цепь замкнулась через тело человека, шунтирующая дуга отсутствовала и при этом появился сигнал «земля» или произошло отключение от защитного заземления, то весь ток, вызвавший этот сигнал или действие защиты, прошел через тело человека. В одном таком очень тяжелом случае пострадавший остался жив, несмотря на то, что получил весьма тяжелые ожоги. Бесспорно, такие случаи редки, чаще касание вызывает «перекрытие», а при этом наступает смертельный исход от ожогов. Благополучные исходы наблюдаются либо тогда, когда контакт руки с токоведущей частью был плотным, что возможно в случае ошибочной подачи на эту токоведущую часть напряжения, либо тогда, когда «захват рукой» и касание носили короточный характер.

В литературе долгое время отсутствовали данные о значениях токов, вызывающих электротравму, полученных непосредственно при изучении несчастных случаев. Впервые подобные сведения были опубликованы нами в 1953 г. Двумя годами позже это делает и С. Кёппен. Хотя он приводит лишь несколько случаев, его данные интересны. Так, он описывает электротравму с Гансом К., 38 лет, который погиб, по мнению лиц, расследовавших травму, при токе всего 4 мА. Если бы таблицу поражающих токов, которую приводит С. Кёппен, пересчитать по поражающим напряжениям (как видно из книги С. Кёппена, токи устанавливались по напряжению установки в сети), то, несомненно, выявится еще ряд случаев поражения токами в несколько миллиампер. Вместе с тем П. Осипка приводит свои и С. Кёппена данные о благополучных исходах при поражении током в несколько ампер.

Чем объяснить случаи поражения током в несколько миллиампер? Может быть, оценка значения неправильна? Или же здесь имеет место механизм поражения не через фибрилляцию («синяя» смерть), поскольку значение тока весьма мало?

Рассмотрим первое предположение. Конечно, говорить о точном установлении значения поражающего тока не приходится, но пределы его значения при тщательном инструментальном изучении условий поражения все же могут быть достаточно четко выявлены.

Методика определения пределов этих токов была описана в § 5.1, и здесь мы остановимся на ней весьма кратко. Напо-

ним, что к расследованию несчастных случаев, а следовательно, и к оценке значения поражающего тока привлекаются квалифицированные специалисты. Все параметры, включая и электрическое сопротивление человеческого тела, во многих случаях удается измерить. Это позволяет с известной степенью точности определить и значение полного сопротивления электрической цепи, в которой оказался человек. Можно определить и значение напряжения, обуславливающее ток в цепи. Зная это значение, а с известной точностью и полное сопротивление электрической цепи, определяют пределы значений тока, вызвавших поражение. Следовательно, в оценке пределов значений токов, вызывающих поражение, сомневаться не приходится. Их значение в 10, а иногда и в 100 раз меньше значения тока, принимаемого в литературе и в инструкциях за пороговое, безусловно опасное (100 мА).

Полученные нами значения (нижний предел — ориентировочно 1—5 мА) оказались неожиданными, ибо значение тока 100 мА, как и градация тока по физиологическим реакциям, указанным С. Кёппеном, представлялись вполне аргументированными. Наконец, полученные нами данные на первый взгляд противоречат и общеизвестному факту, заключающемуся в том, что подавляющая часть людей без каких-либо сильных болезненных ощущений может касаться по схемам «ладонь — ладонь» и «ладонь — ступня» токоведущих частей, находящихся под напряжением 220 В, хотя при этом через тело человека проходит ток, значительно превышающий 1 мА.

Еще в 1936 г., расследуя групповое поражение электрическим током, мы получили значения поражающих токов и напряжений, резко отличные от общепризнанных значений. Экспертная комиссия, долго и придирчиво знакомившаяся с нашим заключением, подтвердила его неоспоримость и указала на необходимость дальнейшего тщательного изучения вопроса. Входивший в число экспертов выдающийся советский физиолог Леон Абгарович Орбели сформулировал свое мнение так: «Надо изучать на животных, собирать по крупницам факты, свидетельствующие и подтверждающие мнение о возможности поражения малым током». По-видимому, если поражение током начинает развиваться не по механизму фибрилляции сердца, а, например, через систему дыхания, ток, приводящий к трагедии, будет значительно меньшим. В 1957 г., а затем в 1961 г. [42] нами были опубликованы новые данные, показывающие уже на большем материале справедливость дискуссионного положения.

Тем не менее, даже после наших публикаций появились монография и статьи, авторы которых практически исключали из рассмотрения поражение током не через фибрилляцию, отвергая возможность поражения током в несколько миллиампер, а стало быть, отрицали и нелинейность зависимости исхода поражения от тока. Появились даже основанные на этих взглядах инженерные рекомендации.

На первый взгляд, возможно, покажется, что материал, собранный в этих источниках, опровергает наши положения, но в действительности это не так. Для доказательства нашей правоты изберем наиболее трудный путь, а именно проанализируем работу П. Осипка, основанную на классификации С. Кёппена и преследующую цель доказать непогрешимость мнения последнего о линейной зависимости исхода поражения от тока. В работе П. Осипка результаты изучения несчастных случаев сопоставлены с данными параллельно проводившихся опытов на животных и наблюдений на людях, т. е. в известной степени повторена принятая нами методика изучения. Материалом изучения явились 767 несчастных случаев. Из них 134 отнесены к группе I (до 25 мА), 264 — к группе II (25—80 мА), 221 — к группе III (80 мА—3 А) и 148 — к группе IV (3 А и выше). Сколько из этих поражений было смертельных, установить трудно, поскольку, судя по тексту, изучались и несмертельные поражения. Источником информации были больницы, где пострадавшие подвергались тщательному клиническому обследованию и лечению. Лица электропрофессий специально не выделены, обстоятельства несчастных случаев не описаны; однако косвенные данные показывают, что основное число пострадавших были электромонтерами и многие происшествия имели место на подстанциях при напряжении 3 кВ и выше. Эксперименты на моделях не проводились, и обстоятельства возникновения электрической цепи через тело человека устанавливались по содержанию актов о несчастном случае и путем опроса лиц, имевших прямое или косвенное отношение к несчастному случаю.

Рассмотрение представленных П. Осипка материалов показывает, что они отнюдь не противоречат нашим выводам и даже подкрепляют их. В самом деле, П. Осипка установил ряд несмертельных поражений при токах выше 80 мА и даже выше 3 А; нами приводились примеры несмертельных поражений и при 7—8 А. Таким образом, первое и притом серьезное возражение против утверждений П. Осипка, а соответственно и других авторов, поддерживающих точку зрения С. Кёппена, налицо. Прямой зависимости исхода поражения от значений тока нет. Подчеркиваем — прямой, ибо в об-

шем случае наличие ее нами не оспаривается, поскольку электротравма при большом токе сопряжена с более тяжелыми поражениями, хотя бы термического характера.

Поражения группы I (при токах менее 25 мА) в работе П. Осипка не подразделяются на подгруппы, поэтому остается неясным, были или не были поражения током до 1—5 мА. Не исключено, что были. Сошлемся на следующее. П. Осипка указывает верхний предел электрического сопротивления тела человека 20 кОм. Если взять половину этого значения (с учетом минимального сопротивления обуви и одежды) и допустить, как это указывается в работе, что поражения происходили в сетях 220 В, то токи в пределах 5 мА были вполне возможны, хотя могли и не попасть в число изучаемых случаев, ибо поражения этими токами нередко ограничиваются электрическим ударом (электризацией — по терминологии П. Осипка), но подчас приводят и к смертельным исходам, не оставляя даже малейших знаков тока. Подобные поражения, как правило, не затрагивают лиц электропрофессий и редко отмечаются на производственных предприятиях при обслуживании стационарных сетей и основного технологического оборудования.

Тем же методом, которым пользовались С. Кёппен и П. Осипка, нами изучено несколько тысяч происшествий. Но в отличие от названных авторов мы смогли экспериментально изучить 223 смертельные и 703 несмертельные электротравмы. Только при таком комбинированном изучении и выявились как малые поражающие токи и большие непоражающие напряжения, так и большие непоражающие токи и малые поражающие напряжения, а это для понимания механизма поражения имеет решающее значение.

Что же представляют собой «малые токи»? Это — токи в несколько миллиампер.

Экспериментальное определение ощутимых токов. Изложенное выше определило потребность обстоятельно, экспериментальным путем определить значения пороговых ощутимых токов.

Целью этих опытов не было исследование физиологической стороны процесса; в них физиологические реакции использовались лишь как показатели степени раздражения. Реакция животного оценивалась по пороговому раздражению, выразившемуся в отдергивании конечностей, и по смертельному исходу. Для человека в качестве критерия реакции организма на возникшую электрическую цепь принималось начальное ощущение, фиксируемое по субъективной оценке испытуемого. Нам представляется, что такая методика иссле-

дования позволяет, не вдаваясь в суть сложных явлений физиологии и патофизиологии, оценивать в первом приближении реакцию организма на электрический ток, его параметры, условия внешней среды, без знания которых нельзя определить критерий опасности.

Обоснованность подобного метода подтверждают опыты на животных, проведенные рядом исследователей для установления связи между поражающим и ощутимым токами. По существу, это единственный метод, позволяющий оценить ряд факторов, связанных с действием электрического тока непосредственно на человека.

Условно назовем ток во внешней цепи, при котором фиксируется реакция организма, начальным ощутимым током. Значение этого тока может быть достигнуто либо постоянным увеличением напряжения от нулевого значения, либо включением электрической цепи через тело человека и животного при определенном напряжении.

Техническая литература по электробезопасности обычно не разделяет эти два вида воздействия и не противопоставляет их друг другу. Иногда между ними даже не делают различия, хотя физиология давно уже учит другому. Эту существенную методологическую ошибку особенно часто повторяют те исследователи, которые в той или иной степени стремятся распространить полученные результаты на условия поражения при неэкспериментальных электротравмах.

Методологически правильнее начинать изучать действие электрического тока на человека и реакцию организма при плавном изменении напряжения. Такое изучение условно назовем исследованием в установившемся режиме, причем заметим, что техника исследования при оценке электрических величин оказывается при этом более простой. Вторым этапом изучения действия электрического тока на человека и реакции организма должно быть исследование, проводимое при подаче напряжения толчком. Такое изучение назовем условно исследованием в неуставившемся режиме.

Сначала были определены на людях значения начальных ощутимых токов в установившемся режиме. Электрическая схема установки показана на рис. 9.6. Измерения начинались с того, что испытуемый садился на стол спиной к исследователю и зажимал в каждой руке цилиндрический электрод диаметром 3 см и длиной 12 см. Изменение площади поверхности соприкосновения электрода с рукой достигалось тем, что часть поверхности электрода изолировали пластиком. Испытуемый говорил: «Готов!», после чего схему подключали к сети и постепенно поднимали напряжение. При появлении

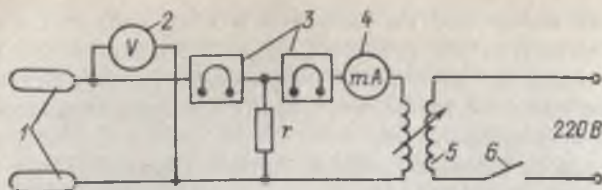


Рис. 9.6. Электрическая схема экспериментальной установки для определения пороговых значений ощутимых токов
1 — электроды; 2 — вольтметр; 3 — гальванометр осциллографический; 4 — миллиамперметр; 5 — регулировочное устройство; 6 — автоматический выключатель

первого ощущения, вызванного током, испытуемый говорил: «Есть!», после чего напряжение постепенно уменьшали. Во время наблюдения принимали меры предосторожности, исключавшие появление опасных бросков тока и напряжения.

Прежде чем зафиксировать данные опыта, производили контрольную проверку, во время которой испытуемый привыкал к обстановке и характеру воздействия. В течение четырех месяцев было проведено в общей сложности около 3000 наблюдений на 282 людях. Для исследования отдельных зависимостей специально подбирали людей, у которых вырабатывалась устойчивая реакция. Так, у одного из наблюдаемых, которого на протяжении четырех месяцев подвергли в общей сложности 23 испытаниям, значения ощутимого тока колебались в пределах всего 1—2 %. Максимальные же колебания значения ощутимого тока у отдельных лиц, подвергшихся наблюдениям, составили 10—15 %.

Опыты по определению пороговых ощутимых и неотпускающих токов, в свое время проведенные Ц. Дальзиелем, несомненно, облегчали нашу задачу. По аналогичной методике измерял пороговые токи и П. Осипка. Измерения, проведенные нами, показывают, что значение ощутимого тока зависит от рода тока. Так, если площадь электродов, находящихся на ладонях, равна 60 см², то среднее значение ощутимого тока составляет 1,9 мА при переменном и 3,15 мА при постоянном токе. Примерно эти же значения пределов ощутимого тока называют Ц. Дальзиель и другие авторы.

Таким образом, значение порогового ощутимого тока в пределах 1—5 мА, определенное для человека различными авторами, проживающими в разных странах и работавшими по различным методикам, можно считать достаточно обоснованным; недаром оно не встречает возражений.

Сопоставим наши данные с данными П. Осипка. Среднее значение полученного нами порогового осязаемого тока частотой 50 Гц составляет 1,9 мА, а у П. Осипка 1,7 мА. Соответствие почти полное. По постоянному току расхождение большее: у нас 5,3 мА, у П. Осипка 8,0 мА. Но и это расхождение, учитывая ряд обстоятельств, нельзя считать принципиально важным.

Существенно то, что значения осязаемых токов соответствуют значениям токов, при которых нами наблюдалось достаточно большое число электротравм со смертельным исходом. В этом нет ничего невероятного — пострадавшие погибали от токов, которые, будучи безопасными для человека, находящегося в обычных условиях, становились жизнеопасными при наличии неблагоприятных условий: цепь возникла через уязвимые к току места; отсутствовал фактор внимания; оказались неблагоприятными условия окружающей среды; произошло стечение этих обстоятельств или, наконец, вступили в действие другие, пока еще не выясненные причины. Надо напомнить и о том, что имеется другая, достаточно большая группа электротравм, при которых токи, во много раз превышающие по своему значению не только осязаемые токи, но и токи, вызывающие фибрилляцию, не сопровождались смертельным исходом.

Неотпускающий ток. В технической литературе бытует, как мы отмечали, термин «неотпускающий ток». Его значение разными авторами оценивается в пределах 20—30 мА. Основой для такой оценки послужили эксперименты на животных и специально проведенные наблюдения на людях. Но поскольку гибель людей при токах в несколько миллиампер доказана с полной несомненностью, следует со всей определенностью заявить, что нормирование по неотпускающему току недопустимо, а продолжение экспериментов на людях по определению значения неотпускающего тока граничит с преступлением, ибо такие эксперименты опасны для жизни человека.

То обстоятельство, что ток в пределах единиц миллиампер убивает, в то время как в эксперименте человек выдерживает и 30 мА, может показаться противоречивым. Но это противоречие кажущееся. Наличие его можно объяснить следующим. Во время испытаний нервная система человека находится в напряженном состоянии, поскольку ему известна опасность электрического тока больших значений. Такое состояние неадекватно обстановке несчастного случая, который может произойти при любом состоянии нервной системы пострадавшего. Несомненно, в напряженнейшем состоянии находилась и нервная система испытуемых животных: в опы-

тах П. Осипка их подвешивали на ремнях, конечности жестко фиксировали (см. § 6.2).

Переходный режим. Согласно закону Дюбуа-Реймона, действие на живую ткань обусловлено не столько значением раздражителя (в данном случае электрического тока), сколько его изменением во времени; поэтому полезно изучить и производные тока по времени.

Исследования переходного процесса, проведенные на человеке при последовательно включенных сопротивлениях, обладающих самоиндукцией, показали, что значения ощутимого тока оказываются иными, чем в цепи, не имеющей самоиндукции. Таким образом, исход воздействия зависит от постоянной времени цепи, а следовательно, и от значения самоиндукции в ней.

Действие неустановившегося переменного тока было проверено в опытах на животных. Принципиальная схема включения приборов оставалась той же, но электроды были расположены на конечностях животного (кошки). При плавном подъеме напряжения реакция животного наступала при 40—80 В. Если же напряжение подавалось толчком, то ту же реакцию удавалось вызвать значительно меньшим напряжением.

Кратность напряжения определяется многими величинами, главная из которых — индуктивность. Плавно поднимаемое напряжение никаких последствий обычно не вызывало. Опыты были проведены на 111 животных, и полученные результаты повторялись достаточно убедительно.

Это явление в несколько ином виде и при других обстоятельствах было обнаружено и описано физиологами А. А. Ухтомским и Н. Е. Введенским. Однако в технической литературе о нем не упоминается, и при разработке защитных мероприятий оно не учитывается.

Сравнение максимальных значений напряжений переходного режима, вызывающих смертельный исход для животного, с амплитудным значением, вызывающим тот же исход при плавном подъеме напряжения, показало, что эти значения достаточно близко совпадают. Это совпадение имеет место тогда, когда переходный процесс продолжается более 10^{-2} — 10^{-3} с. Чем меньше продолжительность переходного процесса, тем больше должно быть амплитудное значение напряжения, чтобы вызвать смертельный исход. Чем больше время переходного процесса, тем меньше должно быть это значение напряжения.

Расчетные и экспериментальные кривые переходных процессов, полученные в опытах на животных, при малых на-

пряжениях в достаточной мере совпали. При более высоких значениях напряжения (установившегося), начиная со 150 В и выше, зависимость тока от времени в переходном режиме, полученная экспериментально, значительно отличалась от расчетной.

Можно предположить, что где-то в тканях создаются напряженности поля, вызывающие явления, сходные с пробоем. Они весьма опасны для организма. Об этом, во всяком случае, говорят факты.

Влияние переходных процессов рассматривалось нами по изменению тока и напряжения внешней цепи. Явления, вызываемые этими процессами непосредственно в теле человека, гораздо более сложны. Важно, что на данном этапе наших познаний удалось показать влияние переходного процесса. Оказалось, что это один из наиболее существенных физических факторов, определяющих исход поражения.

Исследование переходных процессов позволило в какой-то степени оценить и значение опасного для человека времени действия тока. Но это будет рассмотрено далее, в § 9.4. Сейчас же необходимо подчеркнуть, что сопоставление опытных и расчетных данных подтвердило принципиальную возможность исследовать действие электрического тока, пользуясь рекомендованной нами эквивалентной схемой. Для задач, выдвигаемых проблемой электробезопасности, принятые допущения (см. § 8.5) достаточно оправданны. Что же касается изучения биофизики электротравмы, то оно, несомненно, потребует выявления нелинейных закономерностей с последующим уточнением эквивалентной схемы.

Путь тока. Анализ несчастных случаев позволил установить также зависимость их исходов от вида так называемой петли, т. е. от пути тока через тело. С некоторых пор петле стали придавать очень большое значение. Такие исследователи, как С. Кёппен [99], Ц. Дальзиель, О. Маклахнен, В. Ковенховен и другие, утверждают, что только путь тока через жизненно важные органы, в частности через сердце, определяет смертельный исход при токе 50 мА и выше. Н. А. Вигдорчик распределил пути тока по телу по убывающей степени опасности. Интересные данные о значении петли в экспериментальной электротравме получил Г. Л. Френкель [75].

Ц. Дальзиель, В. Ковенховен и другие авторы считают, что соприкосновение с токоведущими частями только какой-либо одной частью тела (например, рукой или ногой) вообще не может привести к тяжелому исходу и что смерть не может наступить, если ток не пройдет по жизненно важным органам — мозгу, сердцу.

В то же время С. Еллинек приводит ряда случаев, когда прохождение электрического тока с одной стороны пальца руки на другую его сторону приводит к смертельному поражению [22].

Не вызывает никакого сомнения тот факт, что места расположения электродов на теле в экспериментальной электротравме, как и места соприкосновения с токоведущими частями при несчастных случаях, существенно влияют и на исход поражения.

Как показывают собранные нами материалы, 55 % всех электрических ударов произошло по двум основным путям (петлям): а) от ладони или ладоней к ногам и б) от одной ладони к другой ладони. Этого, собственно говоря, и следовало ожидать, ибо такое соприкосновение через ладони наиболее вероятно. Но совершенно неожиданным оказалось то, что по этим двум наиболее вероятным путям (петлям) произошло лишь 28 % всех смертельных поражений, а остальные 72 % их произошли по необычным петлям, например от тыльной части руки к ногам (25 % случаев), от ладони к тыльной части руки (28 %). Эти данные убеждают нас в том, что тыльная часть руки — наиболее уязвимое к току место на теле человека. Судя по всему, опасность определяется не тем, протекает или не протекает ток через область сердца, а тем, каким участком тела касается человек токоведущих частей, какова плотность нервных окончаний на нем и имеются ли там акупунктурные зоны. Этот вывод подтверждается и другими данными тех же наблюдений: 27 % смертельных случаев возникли при соприкосновении с токоведущими частями в двух местах на одной руке или на одной ноге. Возможность смертельных поражений при таких касаниях до последнего времени подавляющим большинством авторов отрицалась; было распространено мнение, что в этих случаях человек ощущает лишь электрический удар. Поэтому расследование несчастных случаев, при которых цепь замыкалась на руке или ноге, проводилось нами особенно подробно и тщательно.

Во время расследования рассматривались все возможные пути замыкания цепи через иные участки тела. В расчет принимались только электротравмы, при которых путь тока не вызывал никаких сомнений. Таков, например, случай с регулировщицей, которая с помощью отвертки производила настройку реле, находившегося под напряжением. Реле было заключено в пластмассовый кожух. Регулировщица сидела на стуле, стоявшем на сухом паркетном полу. Касание возникло между пальцами и тыльной частью руки. Аналогичные случаи имели место при настройке телевизора в агитпункте

и при замене предохранителей на распределительной «сборке» 380 В. Подобный случай электротравмы со смертельным исходом на телевизионной установке описан немецким автором [99].

Несомненный интерес представляет и то обстоятельство, что процент смертельных исходов при поражениях, когда петля проходила через голову, грудь, живот, т. е., казалось бы, была наиболее опасной, почти в два раза меньше среднего процента смертей при электротравмах вообще.

Таким образом, локализация петли, несомненно, сказывается на исходе поражения.

Чувствительные к току (уязвимые) места на теле человека. При соприкосновении с токоведущими частями наиболее уязвимым местом человеческого тела является тыльная часть кисти; к числу других уязвимых мест относятся: рука на участке выше кисти, шея, висок, спина, передняя часть ноги, плечо. Образование электрической цепи через уязвимые места приводит к смертельным исходам даже при очень малых токах и напряжениях, что подробно описано в предыдущих главах.

Зоны акупунктуры имеют во многих случаях определяющее значение в исходе поражения.

Обстоятельному расследованию подверглось большое число смертельных поражений. Вывод об особой опасности образования электрической цепи через уязвимые места на теле человека получил убедительное подтверждение.

Нормирование поражающих токов. Лица, планирующие мероприятия по электробезопасности исходя из того, что безусловно опасным является лишь значение тока 100 мА и выше, утверждают, будто установление менее высокого критерия опасности приведет к резкому возрастанию стоимости защитных мероприятий. Так, Р. Н. Карякин и С. П. Власов, справедливо протестуя против нормирования тока при расчете заземлений лишь по значению полного сопротивления 0,5 Ом, рекомендуют в целях экономии расчет заземления проводить только по току, вызывающему фибрилляцию, хотя ток замыкания на землю, значение которого находится в пределах значения фибрилляционного тока, обычно возникает лишь при серьезных повреждениях изоляции. К тому же авторы не указывают, какую экономию даст их предложение, и это не случайно. В свое время, лет пятьдесят назад, это предложение, может быть, и было разумным, но сейчас, когда требования к изоляции возросли, широко внедряются новые изоляционные материалы, стойкие к влаге и другим воздействиям внешней среды и обеспечивающие

сопротивление, при котором токи не превышают микроампер, положение дел изменилось.

Необходимо нормировать значение тока и при расчете защитного отключения. Но и здесь требования, обеспечивающие работу этой защиты при токах ниже 100 мА, не вызывают особых осложнений.

То же можно сказать и относительно линий электропередачи. Число аварийных повреждений и отключений в них резко сократилось. В Северокавказской энергосистеме, например, за всю десятую пятилетку на ЛЭП 220 кВ и выше не было ни одного случая обрыва. Вероятность поражения людей наиболее опасным шаговым напряжением на этих ЛЭП, таким образом, практически отсутствует. Во всяком случае, устранить возможность таких поражений можно повышением надежности конструкции опор, усовершенствованием способов крепления проводов, применением особо прочных изоляторов.

Безопасным во всех случаях, в том числе и при совпадении любых неблагоприятных факторов, нужно считать ток, который был бы в 8—10 раз меньше начального ощутимого тока, т. е. не превышал бы 0,1 мА. Однако, учитывая малую вероятность сочетания всех неблагоприятных событий, можно для отдельных защитных мероприятий принимать ток, равный ощутимому, т. е. 1 мА. А в некоторых случаях, например на электротехнических объектах, обслуживаемых обученным персоналом (лицами электропрофессий), за основу расчета может быть принят ток, равный 10 мА.

Итак, нужен ли критерий электробезопасности по значению тока? Он нужен, но только по одному значению, а именно по значению ощутимого тока.

9.4. Продолжительность существования электрической цепи

Зависимость исхода поражения от фактора времени. Любое взаимодействие физического фактора с биологическим объектом прямо или косвенно связано с поглощением последним того или иного количества энергии. Не является исключением из сказанного и электрический ток. Вот почему при рассмотрении основных параметров, обуславливающих тяжесть исхода, а иногда и формирующих весь механизм электротравмы, необходимо фактору времени уделять не меньше внимания, чем, например, току и напряжению. При этом следует считаться с наличием противоречий в оценке

безопасного критерия времени существования электрической цепи через тело человека. С одной стороны, наблюдаются поражения с тяжелым исходом даже при небольших токах и очень малой длительности существования электрической цепи через тело человека (доли секунды), с другой — благоприятные исходы (исключая ожоги) при длительности поражения в несколько секунд и более.

Заранее следует предупредить читателя, что мы не располагаем исчерпывающими данными, позволяющими указать для каждого из возможных условий четко очерченные интервалы безопасного времени существования электрической цепи. Поэтому данный параметр рассматривается лишь с точки зрения максимальной и минимальной вероятности опасных событий. Именно отсутствие однозначного ответа на поставленный вопрос и заставляет автора осветить, пусть кратко, разные стороны явлений, связанных с оценкой безопасного для человека времени существования электрической цепи через его тело. Начнем, как и обычно, с краткой истории изучения фактора времени.

Впервые влияние времени действия тока на исход поражения обнаружил А. Вольта почти два столетия тому назад. Однако эти его наблюдения остались незамеченными, и в физиологии долго господствовал закон Дюбуа-Реймона, согласно которому действие тока обусловлено главным образом изменением его во времени. Закон Дюбуа-Реймона давал, казалось бы, удовлетворительное объяснение ряду явлений, в том числе и меньшей опасности токов высокой частоты; поэтому на протяжении долгих лет он не подвергался сомнению. Поворотным моментом в изучении фактора времени было небольшое, но очень тщательно выполненное экспериментальное исследование Ф. Хурвега, который показал, что значение ощутимого напряжения для человека обратно пропорционально времени действия.

Определение численных значений безопасного времени. Несмотря на то что зависимость исхода поражений от времени действия электрической цепи признается теперь всеми, в литературе имеется очень мало данных, обосновывающих численное значение этого фактора поражения. Ц. Дальзиель, анализируя данные Колумбийского университета, приходит к выводу, что 92,5 % людей могут выдержать без появления опасной для сердца фибрилляции электрический ток, связанный со временем зависимостью

$$I = 0,165 / \sqrt{t},$$

где I — среднее квадратическое значение тока, А; t — время действия тока, с; 0,165 — постоянный коэффициент, установленный опытным путем.

Это уравнение, как вытекает из пояснительного к нему текста, справедливо для интервала времени 0,03—3 с и для токов начиная с 40—50 мА. Для тока, который человек может длительно выдержать, оно непригодно.

Прежде всего надо согласиться с утверждением Ц. Дальзиеля, вытекающим из приведенного уравнения, что значение опасного (и безопасного) времени обусловлено значением тока. Но это не означает, что данное уравнение можно рекомендовать для практических расчетов защитных мероприятий. Дело в том, что численный коэффициент (Ц. Дальзиель называет его величиной постоянной энергии) получен из опыта, условия которого весьма отличны от условий, в которых протекают электротравмы.

Из приведенного Ц. Дальзиелем уравнения следует, что значение тока 100 мА может представить опасность для человека (ввиду появления необратимой фибрилляции) только при длительности его протекания, превышающей 2,7 с; в течение же 1 с человек может перенести ток, даже равный 165 мА.

Названные значения резко расходятся с нашими данными, полученными при расследовании несчастных случаев, а также с материалами других исследователей. Это расхождение лишний раз подтверждает, что указание на 100 мА как на единое пороговое значение безусловно опасного тока недостаточно обоснованно.

Как же велико то время нахождения человека в электрической цепи, которое вызывает его смерть?

При расследовании большинства случаев вероятное время существования электрической цепи через тело пострадавшего определяли опытным путем. Для этого моделировали электрическую цепь, в которой произошло поражение. В нее включали осциллограф. Затем имитировали условия соприкосновения. Оказалось, что почти в 70 % случаев электрическая цепь через тело человека существовала в пределах десятых долей секунды или даже меньше того. Зная время существования электрической цепи и пределы поражающих токов и напряжений, можно ориентировочно подсчитать количество энергии, вызвавшей тот или иной исход.

Исключив 10 % поражений, при которых пострадавший длительно находился в цепи тока, и приняв, что для электротравм со смертельным исходом минимальное наблюдаемое время нахождения погибшего в цепи тока равно 1 с, получим

количество энергии, которое вызывает смертельное поражение: оно находится в пределах 0,5—3 Дж.

В этих подсчетах поражающий ток принят равным 5—15 мА при поражающем напряжении 100—200 В. В ряде случаев поражающий ток, достигавший 7—8 А при напряжении 6000 В, не приводил к смерти в момент поражения. Выделявшаяся при этом энергия измеряется уже в киловатт-часах.

Если произвести подобный расчет энергии, необходимой для того, чтобы вызвать электрическую метку или ожог при малых токах и напряжениях, то окажется, что количество тепловой энергии, выделившейся при электротравме, для этого недостаточно. Остается предположить, что появление электрической метки или ожога связано не только с термическим эффектом, но и с какой-то иной физиологической реакцией.

Ошибка Ц. Дальзиеля заключается в том, что он рассматривает только один механизм действия (другого в условиях его наблюдения он и не мог обнаружить), а именно поражение человека через фибрилляцию, вызванную прямым действием тока на сердечную мышцу. Для этого механизма поражения уравнение достаточно обоснованно. Но смертельный исход при электротравме может наступить не только в результате фибрилляции, вызванной прохождением тока через сердечную мышцу. Такой исход может быть также результатом остановки дыхания или рефлекторного шока, а опасное время для этих механизмов поражения по приведенной формуле установить нельзя. По данным И. К. Мищенко [42], длительности протекания тока 1 и 3 с одинаково опасны, ибо превышают длительность кардиоцикла.

Нелинейный характер зависимости. Зависимость исхода поражения от длительности существования электрической цепи рассмотрена С. Кёппеном и П. Осипка. Последний показывает нарастание тяжести исхода, в частности появление судороги, в функции времени [109]. К сожалению, научная ценность этой части исследования П. Осипка снижается неубедительным описанием методики фиксации времени, в течение которого существовала электрическая цепь через тело человека. Необоснованной остается, например, дискретность классификации, а именно до одной секунды, одна, три секунды и т. д. Малоубедительна и здесь линейная зависимость исхода поражения от продолжительности протекания тока. Эти ошибки настолько существенны, что снижают ценность смежных разделов его исследования.

Интересные взгляды по поводу опасного времени протекания электрического тока через тело пострадавшего были

высказаны на Международном симпозиуме по защите и заземлениям, состоявшемся в польском городе Вроцлаве в 1972 г. Так, Дж. Бигельмейер предложил допустимые токи в функции времени их протекания разбить на две группы в зависимости от того, возможна или невозможна при них фибрилляция сердечной мышцы. По его мнению, это — токи менее 50 мА и более 50 мА. Для первых токов он счел допустимым установить время действия токовой защиты в пределах десятков секунд, для вторых — ограничить время действия токовой защиты 0,1—0,3 с, что находится в пределах полупериода сердечного цикла. Предложение международных комиссий о том, чтобы для токов до 300 мА продолжительность действия выключающих устройств была уменьшена до 0,03 с, Дж. Бигельмейер назвал неоправданным, поскольку при таких токах время отключения 0,1 с уже обеспечивает безопасность. При этом Дж. Бигельмейер достаточно убедительно критиковал попытки Ц. Дальзиеля и П. Осипка описывать явление фибрилляции в функции времени путем простых математических закономерностей. В то же время он игнорировал роль нервной системы в исходе поражения, полагая, как и многие, что смерть от электрического тока возникает лишь вследствие фибрилляции.

Гудэрски и Тересяк отстаивали на этом же симпозиуме требования критикуемых Дж. Бигельмейером международных комиссий. Исходя опять-таки из «фибрилляционного механизма развития электротравмы», они предложили нормировать расчетные значения времени отключения цепи в пределах 0,01—1,0 с для «нефибрилляционных» токов и меньше 0,01 с для токов, вызывающих фибрилляцию сердца. К сожалению, на названном симпозиуме не рассматривался «нефибрилляционный» механизм смертельного поражения.

Проблема временной зависимости привлекла внимание и А. П. Киселева. Используя в основном результаты исследования электротравм на животных, он попытался установить вероятность возникновения фибрилляции в функции времени. Результаты этой работы легли в основу обсуждения «критерия времени» на секции электробезопасности НТОЭП. Предлагалось нормировать допустимые значения токов в функции времени их протекания, в частности нормализовать значения токов для интервалов времени, а именно в пределах 1—0,2 с. Комиссия внесла коррективы в предложенные численные значения, и они приняты следующими:

Время, с	1	0,7	0,5	0,2
Ток, мА	.65	75	100	250

По нашему мнению, однако, какая-либо фиксация линейной зависимости тока от времени не имеет достаточного научного обоснования. Конечно, конкретизация значений расчетных токов в функции времени с принципиальной точки зрения желательна, но детальная нормализация системы «ток — время» объективной ценности не имеет, так как основана на изучении лишь одного механизма поражения — фибрилляции. Правильнее было бы назвать условную длительность протекания тока 1 мА и одно предельное значение тока для расчета защиты. Впрочем, за редкими исключениями (к ним следует отнести, по-видимому, установки электрифицированного транспорта), необходимости даже в подобном дискретном нормировании, по нашему мнению, не имеется. Та или иная нормализация значений «безопасных» токов выше 100 мА и даже 10 мА, несомненно, ведет к снижению уровня электробезопасности, а этого нельзя допускать.

Вместе с тем надо признать, что исследования, сопровождающиеся определением времени действия тока, расширяют наши представления о механизме электротравмы.

Небезынтересны результаты обстоятельных исследований электрических ограждений. По данным Х. Буртона, для их питания применяют импульсное напряжение, причем минимальная продолжительность импульса 0,8—60 мкс. Продолжительность импульса обусловлена амплитудой напряжения. Критерием служит следующее: человек должен, испытав электрический удар при токе в несколько миллиампер, иметь возможность самому оторваться от токоведущего провода. Механизм рефлекторного поражения при этом исключается. Несмотря на незначительную, казалось бы, продолжительность такого воздействия, оно может привести (правда, при наложении ряда неблагоприятных условий) и к смертельным поражениям.

Таким образом, данные, собранные при расследовании несчастных случаев, и данные косвенных наблюдений указывают на то, что электрическая цепь, существующая в течение миллисекунд, не является безопасной. Чтобы учесть вероятность событий, требуется, как уже это было сделано в отношении тока, определить значение предельного интервала времени, в течение которого электрическая цепь не приводит к тяжелому исходу.

Связывая исход электротравмы с воздействием тока через нервную систему, логично определить те интервалы времени, в течение которых нервная система еще реагирует на электрическую цепь. За последнее время опубликован ряд работ, показывающих, что потенциал действия, этот опреде-

ляющий фактор реакции нервной системы, может возникнуть, если электрическая цепь находилась в замкнутом состоянии на протяжении всего лишь 10^{-6} — 10^{-7} с. Сошлемся на Ю. Г. Антомонова и Л. В. Решодько. Изучая биостимуляцию, они установили, что при импульсном воздействии на одиночный нерв реакция (появление потенциала действия) наступает при импульсе продолжительностью 10^{-7} с. Они пишут:

«Мы перешли принятый в физиологии порог краткосрочности раздражающего действия (10^{-5} с) на два порядка (10^{-7} с), но не обнаружили предела ширины стимула, на которую уже нельзя получить ответный ток действия».

К этим же выводам пришел и Д. Н. Насонов. Он указывает, что возбуждение нерва может наступить даже в течение микросекунды, если амплитудное (или максимальное для несинусоидальной кривой) напряжение превысит пороговое значение при постепенном подъеме в 10^5 — 10^6 раз, т. е. для одиночного нерва составит 100—150 В.

Нельзя забывать, однако, и того, что зарегистрирован ряд случаев, не окончившихся смертью, хотя человек относительно длительное время находился в электрической цепи, по которой протекал ток, достигавший десятков миллиампер, а в одиночных случаях исчислявшийся даже амперами. Остается предложить одно — исходить из сочетания вероятностных событий, как это уже было сделано при определении допустимых (нормативных) критериев по напряжению и току.

Совершенно очевидно, что обеспечить в течение микросекунды отключение источников питания при возникновении электрической цепи через тело человека крайне трудно, а в сетях напряжением ниже 1000 В прямо-таки невозможно.

Впрочем, это и не нужно. Действительно, вернемся к упомянутым выше результатам исследования, в частности к тем, о которых пишет Д. Н. Насонов. Он наблюдал микросекундную реакцию нерва на электрический ток только тогда, когда амплитудное значение действующего на нерв напряжения достигало 150—200 В. Учитывая распределение электрического сопротивления тела человека, надо полагать, что напряжения этого значения возможны лишь тогда, когда общее поражающее напряжение достигает киловольт. А поэтому для сетей напряжением ниже 1000 В необходимости в таком быстродействии защиты нет. Что же касается сетей напряжением выше 1000 В, то в них вероятность замыкания через уязвимые к току места на теле человека практически исключена. Электрическая цепь возникает здесь чаще всего по схеме «ладонь — ноги» и «ладонь — ладонь». К тому же

пораженного в этих сетях, как правило, боится фактор внимания, существующий даже в тех случаях, когда происходит соприкосновение с упавшим проводом. Словом, в этих сетях, хотя и по другим причинам, чем в сетях напряжением ниже 1000 В, микросекундного быстрого действия защиты по условиям электробезопасности не требуется.

Учитывая опыт эксплуатации и ориентируясь на данные биологических исследований, можно (хотя мы и не располагаем для этого достаточной научной аргументацией) принять для расчета и оценки защитных мероприятий допустимый интервал времени существования электрической цепи через тело человека 0,01—2 с.

Выбор конкретного значения времени в этих пределах надо производить с учетом обстановки и возможного сочетания неблагоприятных факторов. При наличии условий, могущих отягчить поражение, следует принимать минимальное значение, а в благоприятных условиях — большее значение, но не выше 2 с. Указанные границы временных пределов установлены с учетом данных биофизического взаимодействия тока с телом человека в условиях электротравм и реальной возможности их обеспечения более или менее доступными техническими средствами. Аргументированных данных для большей дифференциации этих временных значений, так же как и для их регламентации в функции тока или напряжения, в настоящее время еще не имеется.

9.5. Что опаснее — переменный или постоянный ток?

Углубленное и разностороннее изучение электротравм, выявившее, что на исход их воздействуют новые, прежде не принимавшиеся во внимание факторы, осложнило, казалось, уже решенную однозначную задачу о сравнительной опасности переменного и постоянного тока (см. § 3.2 и 5.3).

Группа ученых Академии наук Киргизской ССР, ряд лет изучавшая электротравму под руководством члена-корреспондента этой академии, проф. Г. Л. Френкеля, нашла новые данные, характеризующие (в экспериментах на собаках) соотношение опасности переменного и постоянного тока при стандартных напряжениях 12; 36 и 120 В. Оказалось, что для «стандартных петель» (электроды на конечностях) опасность поражения при 120 В постоянного тока равна опасности поражения при 42 В переменного тока. Показано, что особой разницы между опасностью поражения при 36 В постоянного

тока и 12 В переменного тока нет (во всяком случае, в лабораторном эксперименте).

Очень важно и отмеченное школой Г. Л. Френкеля влияние площади электрода на степень опасности при поражении переменным током.

Еще И. Р. Тарханов в 1903 г. и В. Ю. Чаговец в 1903—1906 гг. установили, что степень опасности зависит от расположения полюсов источников постоянного тока. Если отрицательный полюс источника подключен к электроду, расположенному на верхней части тела, а положительный — к электроду на нижней его части, то опасность поражения больше, чем при обратном расположении. К. А. Ажибаев, развив это наблюдение, показал, что при расположении отрицательного электрода на верхних частях тела фибрилляция у собак наступает раньше, чем при обратном его расположении. Это наглядно демонстрировалось на двух собаках, последовательно включавшихся в цепь. Попытку объяснить аналогичные результаты своего исследования предприняли Вильке и Г. Брехаммер. Реакция на полярность источника питания проявляется, по К. А. Ажибаеву, у различных животных по-разному.

Крайне интересны в рассматриваемом плане исследования, проведенные Гудэрски и Тересьяк в 1970—1972 гг. Ценность этих исследований заключается в том, что сравнительная оценка действия постоянного тока и тока промышленной частоты дана авторами в функции времени. При плавном увеличении напряжения от нуля тяжесть поражения животных при постоянном токе в несколько раз меньше, чем при переменном токе 50—60 Гц. Если же подавать напряжение переменного и постоянного тока кратковременно, то появляется различие в эффекте действия постоянного и переменного тока. Это позволило указанным авторам утверждать, что мнение о меньшей опасности постоянного тока ошибочно для момента образования электрической цепи через тело человека, т. е. для момента «включения». Подобное утверждение полностью согласуется с нашим мнением, изложенным в § 9.3 и 9.5. Далее Гудэрски и Тересьяк делают попытку объяснить различие в действии на человека постоянного и переменного тока. По их мнению (тоже в общих чертах разделяемому автором), постоянный ток не вызывает судорожной реакции, характерной для переменного тока. Следовательно, не существует предельных значений, называемых «постоянным неотпускающим током». А стало быть, нет достаточных биофизических обоснований для нормирования защитных мероприятий по постоянному неотпускающему току.

хотя неотпускающий ток и при постоянном напряжении все-таки иногда может вызвать парез мышц рук.

Казалось бы, сказанное опровергает утверждение, будто при постоянном напряжении судорог нет. Но все дело в том, что ток, при котором возникла в данных случаях судорога, настолько велик, что нормировать по нему защитные мероприятия не представляется возможным. При большом постоянном токе, как отмечают Гудэрски и Тересяк, появляется иная опасность — возможность отброса пострадавшего от токоведущих частей, находящихся под высоким напряжением, что крайне редко наблюдается при аналогичных поражениях переменным током. Отброшенный может получить механическую травму, в результате которой (например, при падении) не исключен и смертельный исход.

Пульсирующий постоянный ток (например, при прикосновении к токоведущим частям на выпрямителе) может иногда привести к судорожным реакциям ввиду наличия в нем переменной составляющей. Подобная суперпозиция постоянного и переменного тока особенно опасна. Тяжелый исход может наступить даже в том случае, если каждая из составляющих суммарного тока мала и при действии в отдельности тяжелого исхода не вызывает.

В общем же, следует отметить, что, несмотря на ряд попыток установить сравнительную опасность для человека переменного и постоянного тока, эта проблема изучена явно недостаточно. Ликвидация этого пробела, несомненно, расширит наши представления о биофизике электротравмы.

Чем же можно все-таки объяснить меньшую опасность постоянного тока при плавном увеличении напряжения, установленную пусть только качественно и лишь в опытах на животных, но все же не вызывающую сомнений? Думается, что это надо объяснить в первую очередь тем, что из-за наличия емкостной составляющей в электрическом сопротивлении тела человека плотность тока, а следовательно, и напряженность поля в тканях будут при равных напряжениях в случае поражения переменным током больше, чем при поражении постоянным. Далее, развитие реакции рефлекторного типа сильнее зависит от амплитудных, чем от действующих, значений напряжения. По-разному проявляется при постоянном и переменном токе и нелинейность электрического сопротивления; особенно это касается биофизической специфики, о чем, в частности, можно судить хотя бы по наличию резкого «физиологического восприятия» постоянного тока (см. § 9.3). И, наконец, вероятность образования электрической цепи через уязвимые к току места при переменном токе

больше, чем при постоянном, ибо сети переменного тока охватывают несравненно большее число установок, к тому же самых различных, тогда как сети постоянного тока имеют более ограниченное применение.

9.6. Влияние частоты

Долгое время считалось, что в области низких частот наибольшей опасностью обладает 50-периодный ток. Это положение было впервые сформулировано С. Еллинеком и вошло во многие учебники и монографии. По данным Г. С. Солодовникова и О. Ф. Ушинской, а также Ц. Дальзиеля, пороги реакции на электрическое раздражение переменным током у человека тоже возрастают с увеличением частоты, но в пределах 50—400 Гц сохраняют примерно одинаковые значения (рис. 9.7). Как видно из кривой 5, ток промышленной частоты (50 Гц) приводит к 100 %-ной гибели животных (собак), а при частоте 200 Гц животные не погибают. По

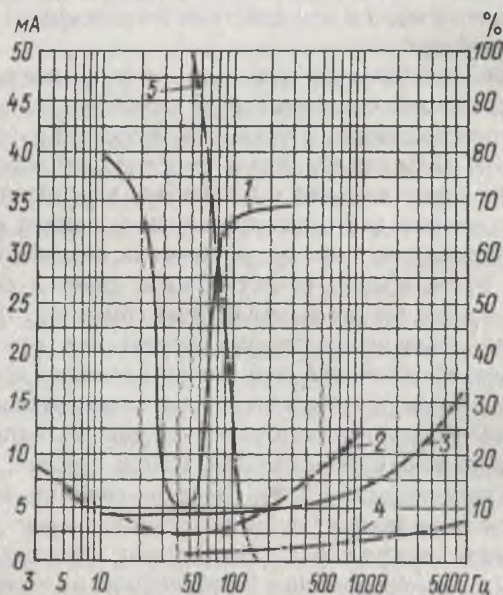


Рис. 9.7. Зависимость осязаемого тока от частоты [42]

1 — по Л. Вольтеру, И. Р. Петрову, Б. И. Кадыкову и Б. В. Орлову; 2 — по В. Е. Манойлову; 3 — по Ц. Дальзиелю (США); 4 — по Г. С. Солодовникову и О. Ф. Ушинской; 5 — изменение процента гибели животных при изменении частоты поражающего напряжения. Кривые 1 и 5 относятся к опытам на животных; кривые 2, 3 и 4 — к наблюдениям на людях

данным Г. С. Солодовникова и О. Ф. Ушинской, минимальные пороговые реакции (по значению осязаемой мощности) находятся за пределами промышленной частоты. Они же установили, что чувствительность к электрическому току по частоте нелинейна и зависит от напряжения. Таким образом, и по этому вопросу накоплено множество противоречивых фактов.

К. А. Ажибаев, И. К. Мищенко, М. Т. Туркменов, Г. Л. Френкель и В. Я. Эскин показали, что опасность возникновения фибрилляции сердца у животных больше при 50 Гц, а опасность остановки дыхания — при 200 Гц. В частотном диапазоне по обе стороны от этих значений опасность тока снижена.

Исследование сравнительной опасности переменного тока частотой 50 и 400 Гц проведено группой сотрудников Московского института инженеров железнодорожного транспорта под руководством А. П. Киселева. Работа показывает, что при ряде условий предпочтительнее применять повышенную частоту 400 Гц. При всей серьезности этого исследования оснований для практической реализации указанной рекомендации, по нашему мнению, еще нет, поскольку эксперименты проводились лишь на собаках и рассматривались поражения только по одному из механизмов, а именно по фибрилляции, что, как нами уже подчеркивалось, снижает доказательность сделанных наблюдений.

Не ставя под сомнение результаты исследования зависимости действия тока от его частоты, следует заострить внимание на следующем. В основе проведенных исследований лежат результаты оценки реакции животного по летальному исходу, вызванному фибрилляцией сердечной мышцы, а при наблюдении на человеке — по осязаемому раздражению. Отсутствие последнего являлось мерилем безопасности. Повидимому, это неправомерно: далеко не всегда отсутствие раздражающей реакции является доказательством отсутствия нарушения, а может быть, и поражения тех или иных тканей, систем и органов; поэтому увеличение частоты, несомненно, снижает опасность. Но вредно или не вредно это, пока полностью утверждать еще нельзя. Изучение сравнительной опасности токов различной частоты целесообразно продолжать главным образом в отношении дыхательного механизма поражения.

Интересное исследование (пожалуй, одно из первых на эту тему) проведено В. И. Шуцким, А. Г. Сидоровым и Ю. В. Снеточкиным по выяснению сравнительной опасности выпрямленного тока. Как они считают, наличие частот-

ных составляющих в выпрямленном токе, несомненно, утяжеляет исход электротравмы. Не вдаваясь в существо исследования, в постановке которого имеются спорные моменты, отметим заслугу авторов: они обратили внимание на малоизученный раздел электробезопасности и представили ценные материалы для обсуждения. Дальнейшие исследования по этой теме следует направить главным образом на расшифровку дыхательного механизма поражения. Основания для такой подсказки имеются.

9.7. Воздействие окружающей среды

Атмосферные условия. Воздушная среда во многих случаях влияет на численные значения поражающих параметров электрической цепи, в которой оказался человек. К таким влияющим атмосферным факторам относятся атмосферное давление, температура, влажность, электрическое и магнитное поля и др.

Многочисленные доказательства влияния параметров окружающей среды находим в опытах на животных (см. § 6.2) и в данных, собранных при анализе электротравм (см. гл. 5). Начнем с температуры воздуха. Ее влияние на биофизические параметры тела человека показано в работах ряда авторов, причем обстоятельнее всего у К. А. Ажибаева. Взаимодействие электрического тока с телом человека при повышении температуры среды проявляется в резком снижении артериального давления и в изменении электрокардиограммы. Сердечная форма смерти становится ведущей, ибо на другой ее форме — дыхательной — изменение температуры окружающей среды сказывается меньше. Объясняется это, видимо, тем, что с повышением температуры дыхательная функция усиливается.

К. А. Ажибаев, опираясь на результаты проведенных им и А. С. Султаналиевым опытов на животных, показывает, что чувствительность к току зависит от диапазона температур. В диапазоне 10—20 °С опасность переменного и постоянного токов возрастает одинаково, в диапазоне 30—50 °С опасность переменного тока увеличивается быстрее, чем постоянного. Отсюда делается вывод, что переменный ток 36 В опаснее постоянного тока 120 В. На этот раз результаты опытов на животных в основном не противоречат наблюдениям, сделанным при электротравмах человека.

Повышение температуры опасно не только тем, что у работающего начинается потоотделение, в результате чего па-

дает электрическое сопротивление его тела. Видимо, перегревание вообще повышает чувствительность к току. Во всяком случае, И. Р. Петров обнаружил это явление у собак, как известно, не имеющих потовых желез. Перегревание можно считать поэтому одной из причин повышенного электротравматизма в странах с жарким климатом, например в наших среднеазиатских республиках.

Примерно так же обстоит дело с повышенной влажностью. И здесь не только снижение электрического сопротивления приводит к повышению чувствительности к току. Надо полагать, что сама повышенная влажность вдыхаемого воздуха снижает общую сопротивляемость организма электрическому току.

Влияние двух рассмотренных выше параметров среды — температуры и влажности — уже нашло отражение в нормативных документах. Но бесспорным представляется влияние на чувствительность к электрическому току и третьего атмосферного фактора — давления окружающего воздуха. На эту тему в послевоенные годы было проведено немало исследований. Началось с того, что морские врачи заметили парадоксальный на первый взгляд факт: ни одной не только смертельной, но даже тяжелой электротравмы не было зарегистрировано при подводной электросварке и электрорезке, хотя случаи соприкосновения лиц, работавших под водой, с токоведущими частями и контактами отмечались неоднократно. Поскольку нами было показано, что разгадка этого феномена не в шунтирующем влиянии воды, пришлось искать ему другое объяснение. Оно было найдено в действии повышенного давления, под которым работают водолазы.

Обратная картина была установлена для пониженного атмосферного давления, что особенно существенно в связи с электрификацией горных районов. Экспериментально доказано, что понижение атмосферного давления увеличивает опасность электрического тока для живых организмов. Опыты, поставленные при различных частотах тока, выявили, что с ростом частоты опасность тока при пониженном атмосферном давлении заметно возрастает. И. К. Мищенко [42] показал, что это справедливо только в случае, если смерть вызывается остановкой дыхания.

Связь между парциальным составом воздуха и силой воздействия электрического тока на человека можно показать на результатах исследования изменений начальных значений ощутимых токов при колебаниях давления окружающей среды. Выяснено, что в условиях как повышенного, так и пониженного атмосферного давления значение этих токов сильно

зависит от содержания в воздухе кислорода. Исследование было проведено в специально приспособленной барокамере, предназначенной для тренировки водолазов. Вместе с испытуемым в барокамере находился врач. Включающее устройство и измерительные приборы были расположены вне камеры. Оказалось, что значение осязаемого тока у одних и тех же испытуемых с изменением условий внешней среды заметно изменяется: с уменьшением сопротивления в контактах уменьшается относительное значение напряжения, приходящегося на кожу, в которой находятся воспринимающие раздражение кожные рецепторы; при сухой коже увеличивается общая напряженность поля в тканях. Следовательно, здесь при относительно малом падении напряжения ток может достигать пороговых значений.

Эти изменения наступают уже на пятнадцатой — двадцатой минуте пребывания в камере. При этом увеличенное парциальное содержание кислорода в воздухе понижает чувствительность организма к электрическому току и, наоборот, уменьшенное парциальное содержание кислорода увеличивает эту чувствительность (рис. 9.8).

Чувствительность к току изменяется также с изменением содержания в воздухе углекислого газа, но зависимость носит здесь противоположный характер: с увеличением содержания этого газа в воздухе чувствительность к току возрастает; среднее значение осязаемого тока при этом уменьшается на 30—40 %.

Если парциальное содержание углекислого газа превышает значение, допустимое по санитарно-гигиеническим нормам (1 %), то чувствительность к току возрастает в два раза.

При возвращении испытуемого в условия нормального состава воздуха во всех случаях восстанавливается значение осязаемого тока.

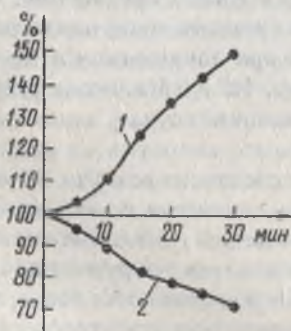


Рис. 9.8. Изменение осязаемого тока (в процентах) в зависимости от продолжительности пребывания человека при различных давлениях

1 — при повышенном давлении (0,6 МПа = 6 ат); 2 — при пониженном давлении (0,05 МПа = 0,5 ат); 100 %-ное значение осязаемого тока — при нормальном давлении

В работе [42] приведены результаты аналогичных опытов на животных. Обнаружено, что при изменении содержания кислорода в воздухе резко изменяется и значение поражающих токов. Увеличение патогенности электрического тока с ростом частоты в условиях пониженного атмосферного давления было обнаружено также другими исследователями.

Парциальное содержание азота в воздухе заметного влияния на реакцию организма при воздействии электрического тока не оказывает.

Опыты на различных видах животных, проведенные под руководством К. А. Ажибаева в горах Киргизии на высоте 2000—4000 м, убедительно подтвердили резкое повышение чувствительности к электрическому току под влиянием условий высокогорья. Если распространить это наблюдение на пилотируемые высотные аппараты, то можно говорить о необходимости повышать надежность авиационного электрооборудования, используемого для полетов в высоких слоях атмосферы, ужесточить проверку изоляции в процессе ее изготовления и эксплуатации.

Изменение значений ощутимых токов при изменении условий среды, бесспорно, связано с соответствующими физиологическими сдвигами. По нашим данным [42], увеличение парциального содержания кислорода в воздухе повышает проводимость тела человека.

Электрическое поле. На человека постоянно действует электрическое поле напряженностью 120—150 В/м, а в предгрозовой и грозовой периоды — еще более сильное. По мнению Д. А. Бирюкова, изучение влияния электрических полей в потоке зарядоносителей-ионов представляет интерес как с точки зрения патогенной (нарушение здоровья), так и с точки зрения биотической стимулирующей роли. Советские ученые А. Н. Обросов, А. К. Булатов, А. М. Скоробогатова, Ф. Г. Портнов и другие доказали, что физиологическое воздействие электрических полей на живой организм объясняется контактом электроаэросистем с тканями организма. Активные вещества, образующиеся при этом в процессе биоэлектрохимических реакций в тканях, воздействуют на нервные рецепторные зоны и рефлекторным путем вызывают те или иные сдвиги систем организма, а это сказывается и на изменении его чувствительности к электрическому току.

Результаты, полученные разными исследователями в нашей стране (А. М. Скоробогатова, З. И. Барбашова, Л. В. Серов, А. Г. Картушенко) и за рубежом (В. Мосс и Х. Шван), показывают, что воздействие ионных потоков при длительном (15—20 суток) нахождении живого организ-

системы заземления и зануления; г) значение напряжения срабатывающих устройств, сигнализирующих об опасной для человека ситуации; д) требования к электрическому сопротивлению полов и поверхности земли на открытых подстанциях любого напряжения.

Начнем с изоляции. Электрически надежная изоляция является основным защитным средством. Есть основание рекомендовать принять предельное значение тока замыкания на землю (тока утечки) равным 0,1 мА. О том, что ток в пределах миллиампера при определенных ситуациях опасен, было достаточно подробно сказано в предыдущих главах книги. Косвенно это нашло свое отражение в 15-м издании английских правил электробезопасности [113]. Поэтому рекомендация в отношении значения тока утечки при выборе изоляции проводов и электрооборудования сделана с учетом вероятностного комплексирования неблагоприятных параметров электрической цепи. Напряжение и время протекания этого тока не нормируются.

Расчет защитного отключения рекомендуется вести, исходя из минимального отключающего тока, значение которого по данным автора книги, совпадающим с данными литературных источников, в среднем меньше половины значения неотпускающего тока, т. е. составляет 10—15 мА. Напомним, что в ряде аварийных ситуаций и этот ток может быть опасен. Опыт последних лет показал, что выполнение данной рекомендации не вызывает особых трудностей. И здесь рекомендация сделана с учетом вероятностного комплексирования неблагоприятных параметров электрической цепи. Продолжительность протекания тока не должна превышать 2 с. Сети 380/220 В, в которых это мероприятие в основном применяется, имеют ток замыкания на землю иногда даже значительно больше 10 мА. В этих случаях обязательно использование дополнительных средств защиты, прежде всего покрытия металлических частей оборудования, могущих оказаться под напряжением, краской, обладающей электроизоляционными свойствами. Дополнительным защитным средством может быть увеличение быстродействия защитного отключения или иных автоматических систем.

Напряжение электросети, электрооборудования и любого электроаппарата — главный фактор поражения человека. По его значению можно наиболее эффективно оценить объем и методы разработки мероприятий по электробезопасности.

Между напряжением электросети и поражающим напряжением есть связь, но она нелинейна. В некоторых случаях

поражающее напряжение равно напряжению электросети, однако чаще всего оно значительно меньше его. В этом отношении большой интерес представляет 15-е издание английских правил электробезопасности, о которых уже упоминалось в этом параграфе. Впервые в таком важном законодательном документе, каким являются правила, указывается, что малое напряжение представляет опасность. Важно отметить, что авторы правил, по существу, обосновывают это положение наличием различных механизмов смертельного действия электрического тока, а именно необратимого поражения центра, управляющего системой дыхания; контрактуры мышц, долженствующих обеспечивать поступление воздуха в легкие; фибрилляции, т. е. несинхронной работы сердечных мышц. Правда, не указывается, возникает ли фибрилляция в случае непосредственного прохождения тока через сердечную мышцу или же она опосредуется через центральную нервную систему.

В целом содержание правил говорит о конструктивном сближении наших представлений о механизме действия электрического тока на человека с представлениями многих зарубежных, да и отечественных авторов. Заслуживает упоминания тот факт, что авторы правил ссылаются на многочисленные наблюдения и экспериментальные данные (судя по всему, полученные на животных), легшие в основу этого документа.

Вернемся к основной задаче параграфа — изложению расчетных рекомендаций. Определению объема и вида защитных мероприятий по электробезопасности должна предшествовать классификация электрооборудования и источников электропитания по значению напряжения: до 50 В (малое), 50—1000 В и выше 1000 В. По-видимому, строительство линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше делает целесообразным выделение их в особую группу.

Для переносных светильников и для переносных электроприемников в помещениях, относимых по условиям электробезопасности к категории опасных и особо опасных, нужно принимать напряжение 12 В переменного тока и 24 В постоянного тока. Во всех случаях, включая и бытовые сети, следует принимать 127; 220 и 380 В, повысив эксплуатационные требования к изоляции и усилив контроль за ее состоянием.

При расчете заземления в сетях напряжением ниже 1000 В можно ограничиться нормативным сопротивлением заземления, указанным в действующих «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей и прави-

средств изоляции в данном случае используются перчатки, полы и т. п.

Из всех областей практической электротехники изоляционная техника, сформировавшаяся в самостоятельную отрасль техники, развивается, пожалуй, наиболее высокими темпами. Еще сравнительно недавно перечень материалов, применяемых для изоляции, ограничивался десятком наименований, а сейчас им посвящается обширная справочная литература. Одним из лучших является справочник П. Е. Готмана, В. Б. Березина, А. М. Хайкина. Ниже приводятся лишь те сведения об изоляции, которые необходимы для общей оценки возможности изоляционной техники обеспечить электробезопасность путем ограничения возможного тока, протекающего через тело человека, до значения порядка 100 мкА.

Характерной особенностью выпуска электрооборудования конца 70-х — начала 80-х годов является широкое внедрение новых видов изоляционных материалов. Это привело к значительному сокращению числа электротравм, происходящих в результате непродуманного применения изоляционных материалов или их неправильного конструктивного воплощения. Резко снизились, например, поражения, вызванные использованием для установочных материалов пластмасс с низкой эксплуатационной надежностью. Однако еще имеются большие возможности для дальнейшего повышения надежности эксплуатации электрооборудования путем улучшения качества изоляции. Об этом свидетельствуют хотя бы сведения о параметрах изоляции.

Начнем с пластмассовых материалов. Вообще говоря, их качество, их физико-химические и механические характеристики непрерывно улучшаются. Но вот применение фторопластовых элементов оборудования приводит к выделению токсичных аэрозолей. Перспективно использование для изоляции материалов с упорядоченной структурой веществ, в частности керамических. Практически во всех конструктивных элементах электрооборудования, особенно массового применения, где требуется электрическая, механическая и термическая надежность, могут найти применение материалы, заменяющие металл, в том числе комбинированные, с покрытиями из химически стойких и безвредных красителей. Проблема создания в установках напряжением ниже 1000 В изоляции, уменьшающей ток через тело человека до десятых долей миллиампера, крайне важна. В неблагоприятных условиях окружающей среды такая изоляция может стать надежнейшим средством борьбы с электротравматизмом.

Но изоляция деталей оборудования — это не единственный вид изоляции, которую можно использовать в качестве защитного средства. С конца 50-х годов в целях электробезопасности начинается использование изолирующих свойств окраски. Изоляционную окраску металлических частей оборудования, нормально не находящихся, но могущих оказаться под напряжением вследствие повреждения основной изоляции, целесообразно назвать «защитной изоляцией». Как правило, функцию защитной изоляции должна выполнять окраска оборудования, необходимая для предохранения металлических частей от коррозии. Своевременность этого мероприятия обусловлена тем, что в качестве материалов для корпусов аппаратов, приборов и даже двигателей вместо металлов все шире начинают применять их заменители, а следовательно, заземление доступных для прикосновения корпусов оборудования так или иначе теряет универсальность.

Целям защитной изоляции лучше всего отвечают лаки, смолы, электроизолирующие пленки и, наконец, обычные эмалевые краски. Выбор пригодных для этой цели веществ, не создающих токсичной пыли, как видим, довольно велик. Для защитной изоляции пригодна и обычная масляная краска, если она надежно и полностью покрывает все металлические части оборудования, в первую очередь доступные для прикосновения. Конечно, ее электрические характеристики хуже характеристик специальных изоляционных покрытий, а именно электрическая прочность равна 10—15 кВ/мм. Однако если учесть, что основное назначение масляной краски — служить антикоррозионным покрытием, а электрозащитные свойства являются ее попутной, дополнительной функцией, то значения приведенных параметров можно считать для нее вполне достаточными.

Несколько слов об изоляции проводов и кабелей. Отошли в область истории провода и кабели с каучуковой изоляцией. Значительно сократилось применение хлопчатобумажной изоляции. На смену ей пришла изоляция из синтетических материалов. Пробивное напряжение проводов при выпуске с завода в 10—15 и более раз превышает значения рабочих напряжений. Слабым местом, как и ранее, являются муфты, разделки соединения. Но и здесь имеется значительный прогресс, объясняемый внедрением новых изоляционных материалов.

Современное развитие технологии получения синтетических материалов, внедрение их в электротехническую промышленность позволяют выпускать электрооборудование повышенной изоляционной надежности, вполне обеспечиваю-

шей требования электробезопасности. Конечно, заменой металлических деталей и конструкций изоляционными материалами все недостатки оборудования с точки зрения электробезопасности не устраняются. Однако, несомненно, эта замена является одним из основных путей изжития электро-травматизма.

10.2. Качество изоляции и методы профилактических испытаний ее

Требования к изоляции. Изоляционные качества материала могут быть отличными, но неграмотное использование его в той или иной конструкции или детали оборудования может снизить надежность изоляции аппарата (прибора) в целом. К тому же результату нередко приводит и неудовлетворительная эксплуатация оборудования. Это вызвало необходимость сформулировать конструктивные (заводские) и эксплуатационные требования к изоляции. Они нашли свое выражение в нормировании параметров, характеризующих свойства изоляции применительно к технологии изготовления и к различным условиям эксплуатации. Требования приведены в «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ), в «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилах техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ), в государственных стандартах и других нормативных документах [59, 60, 67, 70].

Сопротивление изоляции, согласно ПТЭ, должно составлять 10 МОм для цепей релейной защиты постоянного тока, 6 МОм для цепей релейной защиты переменного тока, 2 МОм для вторичных обмоток измерительных трансформаторов, 25 МОм для релейных аппаратов и 1 МОм для цепей автоматического электропривода. Активное сопротивление изоляции силовых трансформаторов не нормируется. Значение сопротивления изоляции пускорегулирующих аппаратов, контакторов, магнитных пускателей и автоматов, связанных с пусковыми схемами электродвигателей, также не нормируется. Но качество изоляции подлежит, согласно требованиям ПУЭ и ПТЭ, регулярной проверке.

Критерием для суждения о том, допустима или не допустима эксплуатация изоляции при данном ее состоянии, служит сравнение значений сопротивления изоляции, измеренных в процессе эксплуатации, с первоначальными значениями, полученными перед вводом оборудования в действие. Сопротивление считается недостаточным, если налицо резкое

снижение сопротивления изоляции по отношению к первоначальным значениям — на 30 % и больше.

К сожалению, совсем не нормируется или нормируется без достаточного обоснования сопротивление изоляции того оборудования, на котором наблюдается наиболее значительное число электротравм; сюда относятся сварочные аппараты, крановое оборудование, переносные электроприемники, высокочастотные установки, электрические сети на строительстве, электрические сети в помещениях, загрязненных пылью и химическими выделениями, в цехах электролиза и т. д.

Тенденция к ужесточению требований, предъявляемых к изоляции, и к увеличению объема испытаний нашла свое отражение уже в ПУЭ, изданных в 1966 г., в ПТЭ для электроустановок потребителей и в ПТБ при их эксплуатации. В этих документах предусмотрено, например, значительно большее число объектов, сопротивление изоляции которых должно проверяться мегомметром 1000 и даже 2500 В. Четко сформулировано представление об участке сети. В правилах записано, что в силовых и осветительных электросетях сопротивление изоляции должно проверяться только мегомметром 1000 В (ранее 500—1000 В), причем изоляцию на участке между смежными предохранителями проверяют при снятых плавких вставках или отключенных автоматах.

Однако ряд существенных недостатков в правилах еще сохраняется. В частности, следует отметить, что требования к сопротивлению изоляции при эксплуатации установок напряжением ниже 1000 В по-прежнему ниже требований к сопротивлению изоляции, которые предъявляются при выпуске провода, кабеля и оборудования заводами.

В решении этой важной с точки зрения электробезопасности проблемы на протяжении многих лет нет существенных изменений по той причине, что состояние изоляции сетей и оборудования в процессе эксплуатации изучается недостаточно, особенно при напряжении ниже 1000 В. Кроме того, недооцениваются изменения в надежности электрооборудования и сетей благодаря применению новых изоляционных материалов. Конечно, положение сложное. В эксплуатации находится огромное количество оборудования, проводов и кабелей, имеющих старую изоляцию и насчитывающих десятки лет эксплуатации. На предприятиях в ходу большое число аппаратов 15—20-летней давности изготовления. И все это эксплуатируется одновременно с новым оборудованием, изоляционная надежность которого выше на несколько порядков. Тем не менее, в новых и пересматриваемых стандартах на электрооборудование, провода и кабели тен-

денция повышения требований к изоляции должна получить широкое развитие. Соответственно надо резко ужесточить эксплуатационные требования к изоляции по значению активного сопротивления и по пробивному напряжению.

Одновременно полезно изменить и изложение требований к изоляции в действующих правилах устройства электроустановок и их эксплуатации. В правилах должно быть указано, что содержащиеся в них нормативы представляют собой минимально допустимые значения. Повышение требований к надежности электроснабжения оправдывает и значительное повышение эксплуатационных требований к изоляции в местных отраслевых инструкциях. Обоснованием численного увеличения нормативных значений может быть реальное сочетание нового и старого оборудования — данные трех-четырёх серий профилактических испытаний.

Принятые на данный период повышенные нормы для изоляции рекомендуется систематически пересматривать. И это должно стать основой дальнейшего повышения надежности электроснабжения и уровня эксплуатации.

Профилактика неисправностей электрооборудования. Профилактика неисправностей оборудования подразделяется на три основных цикла работ: а) периодический осмотр оборудования и контроль за изоляцией по установленным приборам; б) профилактические испытания; в) профилактические ремонты. Объем, сроки и характер каждого из этих циклов изложены в общих правилах устройства электроустановок и в правилах эксплуатации и в ряде случаев предметно конкретизированы в отраслевых и ведомственных правилах и инструкциях и в других руководящих документах. Требования, содержащиеся в них, отражают накопленный опыт эксплуатации и поэтому в целом достаточно реальны. Надо, однако, подчеркнуть одно немаловажное обстоятельство. Возможности современной вычислительной техники позволяют для каждой отрасли и даже для каждого предприятия найти оптимальное сочетание этих требований, причем за критерий оптимума может быть принята надежность электроснабжения; для некоторых электроприемников она должна быть стопроцентной, для других те или иные кратковременные перерывы в электроснабжении допустимы. Требования безопасности, как правило, сочетаемы с требованиями надежности электроснабжения.

Вторым критерием оптимума является экономичность. Проведение профилактических испытаний и ремонтов стоит немалых денег. Поэтому следует помнить, что дополнительное резервирование коммуникаций и оборудования нередко по-

звolyет отодвинуть сроки наступления испытаний и ремонтов и тем самым дать существенную экономию. Предприятия должны, опираясь на нормативы, изложенные в правилах, творчески, самостоятельно решать эти задачи.

Профилактические испытания. Профилактические испытания представляют собой самостоятельную область измерительной техники со своими решениями и приборной реализацией. Основными являются два метода. Это — оценка состояния изоляции по значению активного сопротивления и испытание изоляции повышенным напряжением.

Измерение активного сопротивления изоляции мегомметром. Снижение значения активного сопротивления изоляции вызывается как распространенными, так и локальными дефектами. К числу локальных дефектов относятся механические повреждения изоляции, разрывы и т. д. Большая часть этих дефектов выявляется при измерениях мегомметром. Мегомметр является массовым, доступным для приобретения прибором. Имеются все основания для правильного выбора мегомметров по напряжению. Это значит, что провода и электрооборудование малого напряжения (65 и 12 В) и нестандартное оборудование напряжением в пределах 100 В и ниже должны проверяться, как правило, мегомметром 1000 В, а при напряжении выше 1000 В — только мегомметрами 1000 и 2500 В.

Испытание повышенным напряжением. В установках напряжением выше 1000 В такие испытания начали широко применяться в Советском Союзе примерно с 1934—1935 гг. Пионерами этого начинания являются Кабельная сеть Ленэнерго, Мосэнерго, Союзтехэнерго. Заслуга названных организаций состоит не только в разработке и внедрении методов профилактических испытаний повышенным напряжением, но и в создании соответствующей аппаратуры. Необходимость проведения испытаний в разных концах города и соответственно питание испытательной установки от любой местной сети предопределили тип передвижной испытательной установки и вид напряжения. Единственным напряжением могло быть напряжение постоянного тока, ибо если емкость объекта профилактики относительно земли велика, то испытание переменным током повышенного напряжения потребовало бы большой мощности и при малогабаритном варианте установки оказалось бы неосуществимым. Напряжение при этих испытаниях подают на токоведущую жилу (деталь), второй конец от испытательной установки замкнут на землю.

Аналогично испытывают и междуфазную изоляцию.

В этом случае напряжение подают на фазные провода соответственно между фазами $A-B$, $B-C$ и $C-A$.

В первые годы после начала профилактических испытаний немалая часть оборудования и кабелей (особенно последних) не выдерживала испытания, хотя кратность испытательного напряжения по отношению к номинальному была сравнительно невелика. Затем число выявляемых повреждений начало сокращаться, что позволило повысить значение испытательного напряжения. Этот шаг не привел к сколько-нибудь значительному увеличению числа случаев, когда оборудование не выдерживало испытаний; обеспечил же он существенное сокращение аварийных повреждений.

В настоящее время оборудование и кабели напряжением выше 1000 В испытываются повышенным напряжением преимущественно постоянного тока. Кратность испытательного напряжения по отношению к номинальному составляет 3—6 в зависимости от рода испытательного напряжения. В ряде энергосистем испытание кабелей 6—10 кВ производится напряжением 50 кВ. Время приложения напряжения 5—15 мин. Имеется ряд случаев, когда «профилактический» пробой наступает на 13—14-й минуте, но таких пробоев относительно немного. В среднем по Союзу процент «профилактических» пробоев от числа испытаний составляет 2,5—5,0 %. Профилактические испытания должны проводиться в полном соответствии с требованиями, изложенными в главе Б-III-7 ПТЭ и ПТБ (1984 г.), а также в Правилах [60].

По-прежнему одним из ведущих предприятий, смело внедряющим современную аппаратуру и новейшие методы в профилактику неисправностей кабельных сетей, является Кабельная сеть Ленэнерго. Среди энтузиастов испытаний повышенным напряжением надо отметить доцента А. П. Щеглова. Представляют интерес, в частности, выводы, сделанные на этом предприятии по результатам профилактических испытаний. В них отмечается целесообразность продолжения испытаний кабелей 6 кВ выпрямленным напряжением 50 кВ. Участки же кабельной сети 6 кВ, переведенные на рабочее напряжение 10 кВ, испытываются при 60 кВ. Испытательное напряжение для кабелей 10 кВ предлагается сохранить в пределах 60 кВ. Отмечается недостаточность испытания кабелей 35 кВ пятикратным напряжением. Повышение его до шестикратного оказалось в этой сети неосуществимым.

Причиной повреждений изоляции, которые вызывают аварийные отключения, в 90 % случаев являются механические повреждения при земельно-строительных работах и ремонтах подземных коммуникаций. Профилактические испытания по-

прежнему выявляют разрушение металлических оболочек кабелей, вызванное коррозией, что, несомненно, объясняется существенными недостатками в реализации мероприятий по защите подземных сооружений от блуждающих токов. Реализация их очень сложна, но необходимость систематической большой работы в этом направлении очевидна.

Долгое время считалось, что проведение профилактических испытаний кабельных линий требует вывода кабельной линии из эксплуатации. Между тем это не всегда возможно. Вот почему передовые энергосистемы, в том числе и Ленэнерго, используют метод, предложенный Г. М. Шалытом, а затем рекомендованный Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики.

По этому методу изоляцию кабелей испытывают без их отключения, путем наложения постоянной составляющей напряжения выпрямленного тока на переменную составляющую рабочего напряжения. Рис. 10.1 дает представление об этом методе. Испытательную установку выпрямленного напряжения на время испытания разземляют и подключают к нейтрали трансформатора. Испытательное напряжение повышают до определенного значения, одновременно испытывая повышенным напряжением изоляцию всех трех фаз целого участка сети: кабелей, трансформаторов, высоковольтных двигателей, измерительных трансформаторов и другого оборудования.

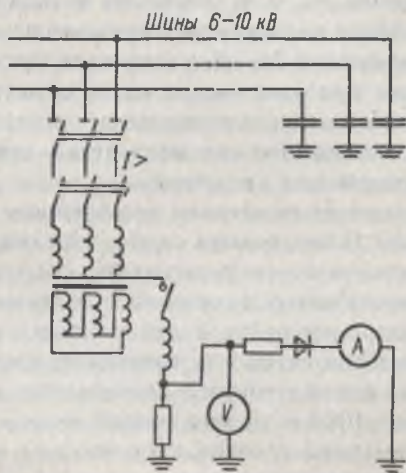


Рис. 10.1. Принципиальная схема испытания электрооборудования и кабелей под нагрузкой

Пробой дефектной изоляции одной из фаз на землю определяют, отключая специальным устройством цепь нулевой последовательности в цепи вторичных обмоток трансформаторов.

Схема устройства обеспечивает сравнение значений тока на фронте волны, первых производных тока по времени и полярности. У поврежденной линии эти показатели отличны от аналогичных показателей у неповрежденных линий. Принципиальное преимущество испытаний под нагрузкой заключается в резком сокращении оперативных переключений, а следовательно, в меньших затратах. Однако в процессе освоения этого метода выявился тот его недостаток, что значение испытательного напряжения приходится принимать меньшим, чем при испытании оборудования по элементам. Вот почему и здесь поучителен опыт испытания кабелей Кабельной сетью Ленэнерго. В качестве испытательной используется установка, позволяющая подавать пульсирующее напряжение 24 кВ. Относительно земли на фазную изоляцию подается максимальное напряжение 30 кВ. Время приложения напряжения 3 мин. Пробиваемость при испытаниях под нагрузкой примерно в два раза ниже пробиваемости при обычных испытаниях. Поэтому совершенно разумен вывод, который делает и автор анализа результатов испытаний инженер П. П. Ширяева, и руководство Кабельной сети Ленэнерго о том, что испытания под нагрузкой следует довести в среднем до 3—4 раз в год, а 1 раз в два года проводить испытания этих же кабелей с отключением, т. е. обычными методами. Последнее в известной степени компенсирует применение несколько пониженного напряжения 24 кВ, увеличение которого пока невозможно. Даже при увеличении числа испытаний, которое неизбежно при уменьшении значения испытательного напряжения, технико-экономические показатели свидетельствуют в пользу испытаний под нагрузкой.

Профилактические испытания повышенным напряжением в сети ниже 1000 В внедряются слабо, хотя опыт показывает целесообразность и здесь испытывать оборудование этим методом. Установившегося мнения о параметрах и всем объеме испытаний нет, хотя в действующих правилах для некоторых элементов сетей эти испытания предусмотрены.

При выборе испытательного напряжения для сетей напряжением ниже 1000 В можно воспользоваться опытом подобных же испытаний в сетях напряжением выше 1000 В, т. е. выбрать напряжение, превышающее в 1,5 раза значение испытательного напряжения, предусмотренное приемосдаточными испытаниями на переменном токе. Начинать профи-

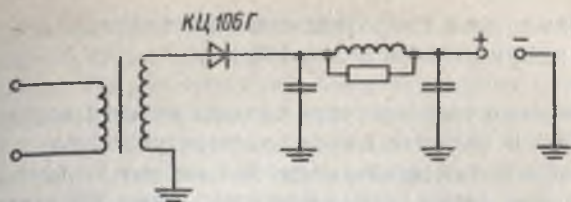


Рис. 10.2. Схема испытания изоляции электрооборудования, проводов и кабелей напряжением ниже 1000 В

лактические массовые испытания сетей напряжением ниже 1000 В можно с напряжения выпрямленного тока, равного напряжению переменного тока, предусмотренному в качестве испытательного при вводе сетей в эксплуатацию. Если после начала испытания выявится, что число пробоев при этом напряжении велико или что изоляция пробивается и при отсутствии повреждения, то испытательное напряжение следует снизить.

Испытательную установку можно собрать, по существу, в электроцехе любого предприятия. Схема и основные параметры установки показаны на рис. 10.2. Вольтметр должен быть включен в первичную цепь. Опыт использования подобных установок показывает, что, несмотря на заводское изготовление, они очень удобны в эксплуатации, но нуждаются во внимательном обслуживании, поскольку напряжение на них высокое.

Внедрение в сети напряжением ниже 1000 В испытания повышенным напряжением, несомненно, повысит их надежность и безопасность. Но это не исключает испытания сопротивления изоляции мегомметром повышенного напряжения, применение которого отличается исключительной простотой.

Профилактические испытания, в особенности испытания повышенным напряжением, резко снижают аварийность и внезапный выход оборудования из строя. Тем самым они повышают безопасность обслуживающего персонала. Благодаря правильной постановке испытаний, улучшению качества заводской продукции и капитальных и текущих ремонтов электрооборудования аварийность систематически снижается.

Изложенные выше соображения достаточно красноречиво показывают, что комбинированные профилактические испытания повышенным напряжением повышают надежность эксплуатации и безопасность обслуживания. Настало время нормировать оптимальные условия, параметры и объемы испытаний повышенным напряжением в сетях ниже 1000 В.

10.3. Измерение сопротивления изоляции в сети напряжением ниже 1000 В

Измерение сопротивления изоляции в сети напряжением ниже 1000 В является широко распространенным, массовым профилактическим испытанием. Вот почему поучительно ознакомиться с результатами изученных нами 200 тысяч измерений, проведенных на большом числе самых различных предприятий.

Данные по промышленности в целом. В соответствии с действующими правилами измерению подвергались междофазная изоляция и изоляция между фазой и землей. Подавляющее число измерений сопротивления изоляции выполнялось с помощью стандартных отечественных мегомметров напряжением 500 В. Измерения сопротивления изоляции участков сети производились на промышленных предприятиях и в научно-исследовательских институтах машиностроительной, химической и пищевой промышленности. Значительная часть сведений для анализа была получена из отчетов промышленных предприятий о результатах профилактических испытаний. Полученные данные позволяют сделать следующее заключение.

Число участков силовой сети с сопротивлением изоляции ниже 1 МОм в 1948—1957 гг. составляло меньше 5 %, в 1957—1969 гг. — уже 3,5 %, в 1980 г. — лишь 1,8 %. Сопротивление изоляции выше 10 МОм в 1947—1957 гг. имели 78,6 % участков сети, в 1975—1980 гг. — уже 88,4 %. В последующие годы этот процент еще увеличился. Только на отдельных предприятиях, эксплуатирующих электрические сети в сырых и особо сырых помещениях или в условиях неблагоприятной для изоляции среды, число участков сети, имеющих сопротивление изоляции ниже 1 МОм, достигает 23 %. Сопротивление изоляции проводов в осветительной сети ниже, чем в силовой. Это в известной степени показывает, что силовые сети эксплуатируются тщательнее сетей освещения. Сопротивление изоляции относительно земли ниже сопротивления изоляции между фазами. Это объясняется снижением сопротивления всей изоляции относительно земли в местах разделок и в кабельных муфтах.

В целом результат анализа численных значений сопротивления изоляции показывает, что на отдельных предприятиях идея об ужесточении требований к изоляции имеет предметное воплощение. Выявляя и устраняя участки (места) с сопротивлением изоляции ниже средних по предприятию значений (пусть даже в пределах нормативных зна-

чений), эти предприятия добились значительного повышения надежности электроснабжения и повышения уровня электробезопасности. На них почти не было электротравм с тяжелым исходом. Есть все основания для того, чтобы за нижний предел допустимого сопротивления изоляции, за исключением сырых, особо сырых помещений и помещений с агрессивной средой, принять не 0,5, а 5,0 МОм. Увеличения капитальных затрат при этом не потребуется, а надежность эксплуатации значительно возрастет.

Изоляция в особо сырых помещениях. Рассмотрим данные о сопротивлении изоляции электрических устройств, работающих преимущественно в особо сырых помещениях. В число анализируемых помещений вошли 38 бань, 11 прачечных, кожевенные и некоторые другие предприятия. Отключающие и распределительные устройства находятся, как правило, вне сырых помещений, причем проводка выполнена кабелем или проводом в газовых трубах. Распределительные щиты собраны преимущественно на мраморе. Результаты измерений показывают резкую разницу значений сопротивления изоляции между фазами и между фазой и землей. Так, сопротивление выше 10 МОм у междуфазной изоляции встречалось чаще, чем у изоляции между фазой и землей (62,11 и 28,06 %). Сопротивление ниже 1 МОм выявилось у междуфазной изоляции в 30,33 % случаев, у изоляции между фазой и землей — в 53,41 % случаев. В этих помещениях значительно больше участков сети, имеющих сопротивление менее 1 МОм: они составляют 30—35 %. В целом по всем предприятиям число подобных участков не превышает 7—8 %. Объяснить это можно тем, что снижение сопротивления изоляции до 4 МОм и менее обусловлено поверхностной проводимостью, которая зависит от вида проводки и применяемого оборудования. В особо сырых помещениях встречается большое число проводок на изоляторах. Влияние среды на поверхностную проводимость междуфазной изоляции и изоляции относительно земли при этом виде проводки значительно больше, чем при использовании кабеля.

Эффективность профилактических испытаний. Многолетние наблюдения за отдельными предприятиями показывают, что организация и проведение профилактических испытаний, безусловно, приводят к увеличению числа участков сети, имеющих более высокое сопротивление изоляции. Если на отдельных предприятиях такого увеличения и не отмечается, то объясняется это главным образом организационными причинами. Так, профилактические испытания изоляции до последнего времени даже на крупных предприятиях проводятся

наладочными организациями, иногда занимающимися этими измерениями как побочным делом, совершенно случайно. Из-за этого результаты измерений надлежащим образом не анализируются и на ликвидацию недочетов должного внимания не обращается. Были случаи, когда на протяжении ряда лет измерения устанавливали весьма низкие сопротивления изоляции, к тому же снижавшиеся от первых измерений к последующим, однако замена изоляции на подобных участках сети так и не осуществлялась.

Значительно выше эффективность профилактических измерений на тех предприятиях, где они проводятся силами самих предприятий и где наряду с этим регулярно выполняются и профилактические ремонты, совмещенные с испытаниями. На таких предприятиях число участков сети, имеющих изоляцию с низким сопротивлением, уменьшается; снижается и число аварийных отключений оборудования. На одном предприятии после проведения профилактических испытаний число замененных за год предохранителей уменьшилось более чем в 2,5 раза. Однако далеко не всюду профилактические испытания сопровождаются практическими мерами по увеличению сопротивления изоляции. Поясним сказанное двумя примерами.

Пример 10.1. Рассмотрим два сходных предприятия. На одном из них число участков силовой сети, имеющих сопротивление изоляции выше 100 МОм, составляет 86,40 % при измерениях между фазой и землей и 93,07 % при измерениях между фазами. На другом предприятии — соответственно 58,13 и 63,44 %. Число участков сети, где сопротивление изоляции ниже 1 МОм, на первом предприятии 2,20 и 1,95 %, на втором — в два с лишним раза больше: 4,42 и 5,51 %. Разница в состоянии изоляции сетей объясняется тем, что в первом случае полные профилактические испытания изоляции проводятся ежегодно начиная с 1946 г.; систематически проводились они и до войны. На втором же предприятии они впервые были проведены после войны, в 1949 г., и притом силами посторонней организации.

На первом предприятии была полностью составлена техническая документация по сети. Кабельный журнал и журнал оборудования позволяли персоналу систематически следить за состоянием сетей. Благодаря этому удалось снизить число участков, имеющих низкое значение сопротивления изоляции. На этом предприятии за 45 лет после ввода его в эксплуатацию не было ни одной электротравмы со смертельным исходом. Число электрических ударов неуклонно снижается, и единичные случаи их объясняются только одной причиной — грубыми нарушениями лицами электропрофессий правил эксплуатации и требований безопасности при производстве электромонтажных работ.

На втором предприятии систематического контроля за состоянием изоляции сети не было. Кабельный журнал сети заполнялся нерегулярно. Результаты проведенных измерений должным образом не анализировались. Только после полного систематического испытания изоляции по всему заводу, позволившего выявить бесспорно аварийные очаги, началось проведение нужных мероприятий. Результаты сразу же сказались: число участков силовой сети, имеющих изоляцию относительно земли выше 100 МОм, увеличилось здесь за три года в 1,75 раза. Соответственно почти вдвое снизилось число участков сети, имеющих изоляцию относительно земли ниже 1 МОм. На этом предприятии была электротравма со смертельным исходом, было также несколько электротравм, повлекших за собой временную утрату трудоспособности, в том числе и частичную утрату зрения, вызванную ослеплением электрической дугой. С введением профилактических мероприятий электротравматизм значительно снизился, хотя число электротравм все еще велико.

На первом предприятии вставку каждого из установленных предохранителей пришлось менять за год в среднем по одному разу. На втором предприятии такую замену производили более трех раз. После профилактических испытаний и профилактических ремонтов число «действий защиты» (аварийных отключений) резко сократилось.

Пример 10.2. На одном крупном заводе после модернизации, во время которой многие технологические операции были автоматизированы, число единиц действующего электрооборудования значительно возросло, персонал же электроцеха почти не был увеличен. В результате электроцех перестал справляться с возросшим объемом работ, профилактика неисправностей изоляции основного электротехнического оборудования ухудшилась, удельное число аварийных повреждений оборудования оказалось в 3—4 раза большим, чем перед модернизацией. Сократился срок работы двигателей после средних и капитальных ремонтов. В частности, возросло число повреждений из-за пробоя изоляции в пазах и из-за понижения ее прочности вследствие попадания смазки на обмотку, недостаточного уплотнения подшипников и т. д.

Последний пример весьма поучителен. Он показывает необходимость жесткой регламентации штата электроцехов промышленных предприятий. Эта регламентация должна исходить из расчета полного и высококачественного выполнения всего комплекса работ по профилактическим испытаниям и ремонтам. От этого зависит обеспечение надежности работы оборудования и устранение очагов возможного электротравматизма.

тические испытания показали, что надежность эксплуатации оборудования заметно повышается в результате замены металлических частей детали изоляционными. Однако это делается далеко не всегда.

Пример 10.3. Гр. У. была смертельно поражена током при работе на электрической швейной машине. Напряжение сети составляло 220 В. Нейтраль была заземлена. Расследование показало, что во время кустарного ремонта швейной машины один из проводов, идущий к выключателю, находящемуся непосредственно в машине, замкнулся на корпус. В момент происшествия пострадавшая рукой коснулась корпуса машины, а ноги в чулках, по-видимому, влажных от пота, поставила на трубу отопления, идущую вдоль стены на расстоянии 18—20 см от пола.

Надо сказать, что даже простая изоляция — окраска — может предотвратить гибель людей. Отсюда ясно, что конструкция любых электроприемников, с которыми возможно постоянное или временное соприкосновение, должна иметь минимальное число металлических частей, доступных для прикосновения. Особо тщательной проверке подлежат места соединений, оборудование и провода, находящиеся во влажных помещениях или в условиях агрессивной среды. Контролем за монтажно-строительными работами также можно усилить электробезопасность.

10.5. Непрерывный контроль за состоянием изоляции

Даже на производстве, где периодические проверки состояния изоляции налажены в совершенстве, методы испытаний позволяют выявлять любые повреждения кабельных линий, электрооборудования, пускорегулирующей аппаратуры и т. д., а сроки между испытаниями оптимально обоснованны, нет полной гарантии того, что при эксплуатации электрооборудования не возникнет аварийных повреждений, а следовательно, и поражений электрическим током. Повреждение изоляции может появиться через день, через час, через минуту после окончания испытаний. Надежность электроснабжения можно обеспечить резервированием питающих линий, но нет такого резервирования, которое могло бы гарантировать полную электробезопасность. Устранить или, во всяком случае, уменьшить опасность поражения человека электрическим током можно организацией непрерывного контроля за состоянием изоляции в процессе ее эксплуатации.

Непрерывный контроль за состоянием изоляции — мероприятие не новое. Его массовое применение совпадает с на-

чалом развития высоковольтных распределительных сетей напряжением 6 и 10 кВ. Эти сети работают в режиме изолированной нейтрали. Непрерывный контроль обеспечивается сравнительно просто. Три однофазных трансформатора напряжения, включенные со стороны напряжения выше и ниже 1000 В в звезду, со стороны обмоток напряжения ниже 1000 В включаются на три вольтметра (рис. 10.3, а). Если сопротивление изоляции всех трех фаз находится в пределах требований, то вольтметры показывают значение фазного напряжения. Когда же на одной из фаз происходит повреждение изоляции, напряжение относительно земли на этой фазе уменьшается. А если сопротивление в месте повреждения равно нулю, это напряжение тоже падает до нуля. При этом напряжение относительно земли на неповрежденных фазах возрастает до линейного. Работа схемы иллюстрируется векторной диаграммой на рис. 10.3, б. По значению изменения напряжения можно ориентировочно судить о значении сопротивления изоляции на поврежденной фазе. Чувствительность схемы обусловлена значением внутреннего сопротивления вольтметров. Чем оно больше, тем с большей точностью выявляется начавшееся повреждение.

Существенным недостатком подобного контроля является отсутствие возможности выявить снижение значения сопротивления изоляции, если оно происходит одновременно и одинаково на всех трех фазах.

Значительно сложнее осуществить массовый непрерывный контроль за состоянием изоляции в сетях напряжением ниже 1000 В.

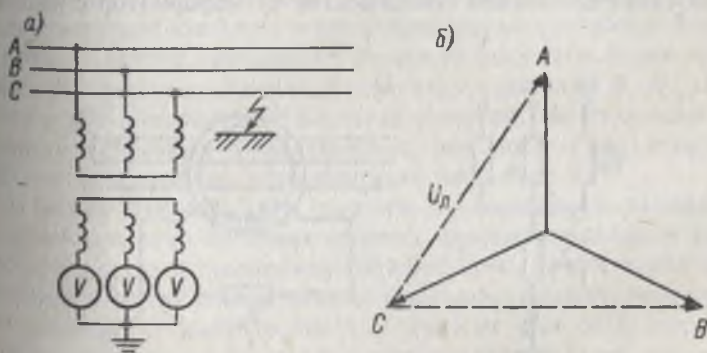


Рис. 10.3. Схема непрерывного контроля за состоянием изоляции в сети напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью (а) и векторная диаграмма к ней (б)

Одна из первых работ, посвященных автоматизации контроля изоляции, принадлежит Н. В. Олехновичу и В. К. Ясному. Оригинально подошли к аналитическому изучению схем контроля шахтных сетей Р. М. Лейбов, Х. М. Желиховский, Ю. М. Мурзанов. Подобные же попытки сделаны зарубежными авторами. Все это позволяет подойти к разработкам научных основ проблемы контроля изоляции в сетях напряжением ниже 1000 В вне зависимости от их назначения. Один из таких подходов сделан Е. Ф. Цапенко [78], предложившим делить схемы контроля следующим образом.

Схемы, работающие на токах нулевой последовательности. В этих схемах токи нулевой последовательности, возникающие в элементах с неравными сопротивлениями отдельных фаз относительно земли, выделяются либо при помощи различных асимметров (рис. 10.4, а), либо в специальных трансформаторах тока нулевой последовательности (ТТНП) (рис. 10.4, б). Асимметры, как правило, применяются в сетях с заземленной нейтралью, а ТТНП — в сетях с заземленной нейтралью силового трансформатора.

Схемы, работающие на выпрямленных токах контролируемой сети. Эти схемы называют также вентильными, так как необходимые для работы токи здесь образуются посредством трех вентилей, подключенных к фазам контролируемой сети. Наиболее характерная из таких схем показана на рис. 10.5, а.

Схемы, работающие на выпрямленных токах постороннего источника. В этих схемах выпрямленные токи, создаваемые посторонним источником энергии, накладываются на токи контролируемой сети (рис. 10.5, б). Обычно в качестве такого источника применяют понижающий трансформатор с выпря-

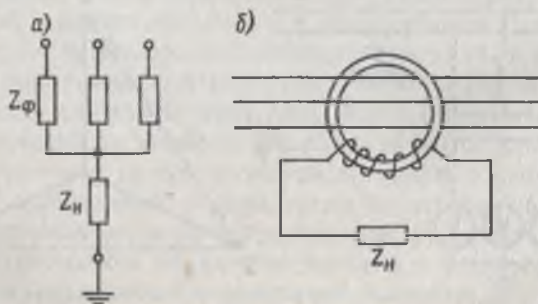


Рис. 10.4. Схема, работающая на токах нулевой последовательности Z_ϕ — сопротивления, включаемые для измерения напряжения на каждую фазу; Z_n — сопротивление нейтрали

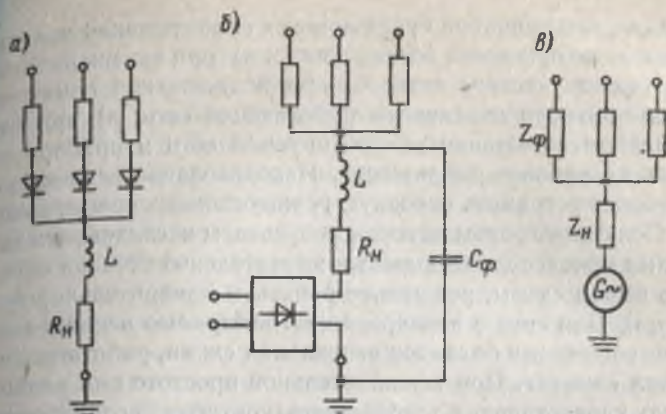


Рис. 10.5. Схемы, работающие на выпрямленных токах

мителями, собранными по однополупериодной, двухполупериодной или трехполупериодной схеме. В частном случае возможен источник с постоянным напряжением, например аккумулятор.

Схемы, работающие на токах постороннего источника с частотой, отличной от промышленной (рис. 10.5, в). В этих случаях обычно применяются токи повышенной частоты, которые накладываются на токи контролируемой сети.

Комбинированные схемы. Эти схемы являются сочетанием схем на токах нулевой последовательности, вентильных и схем с посторонним источником.

Следует отметить, что все схемы могут при необходимости применяться с различными усилителями. Возможно также использование мостовых и компенсационных принципов измерения. О работе схем можно узнать из рисунков. Более подробные сведения о схемах содержатся в работах Е. Ф. Цапенко [78], несомненной заслугой которого является относительно несложное аналитическое описание схем, которое можно использовать в инженерных расчетах.

Важно отметить, что контроль за состоянием изоляции с помощью схем на токах нулевой последовательности возможен в сетях с изолированной нейтралью. Теоретически показано, что работа вентильных схем непрерывного контроля не зависит от индуктивности и емкости фаз относительно земли, поэтому изменение показаний приборов будет соответствовать только изменению активных сопротивлений изоляции. Е. Ф. Цапенко впервые проанализировал причины ложных срабатываний защитных устройств и схем контроля. Он

показал, что причиной таких ложных срабатываний являются переходные процессы, возникающие: а) при включении в эксплуатацию участков сети; б) при подключении самих приборов контроля изоляции к работающей сети; в) при одновременном включении контролируемой сети и прибора контроля на рабочее напряжение. Использование реле времени позволяет устранить основную группу ложных срабатываний.

Полученные этим автором результаты исследования переходных процессов позволяют в значительной степени обосновать выбор схемы, режима ее работы и измерительной аппаратуры. Для сети с изолированной нейтралью несомненными преимуществами обладает вентильная схема, работающая на сигнал «земля». При исключительной простоте она наиболее полно удовлетворяет требованиям контроля, позволяет осуществлять звуковую и световую сигнализацию, а также измерение полного сопротивления изоляции сети относительно земли.

Не потеряла интереса рекомендуемая Е. Ф. Цапенко схема непрерывного контроля изоляции, позволяющая отключить поврежденный участок сети. Для контроля изоляции с отключением сети с изолированной нейтралью в принципе пригодны все рассмотренные схемы непрерывного контроля изоляции. Однако к устройствам защиты здесь предъявляется ряд дополнительных требований по сравнению со схемами контроля, не осуществляющими отключение сети. Наиболее перспективны схемы, работающие от постороннего источника с выпрямителями. Простое усовершенствование этих схем позволяет сделать работу защиты независимой от колебаний напряжения сети, например при использовании компенсационных методов измерения.

«Контроль с отключением» допустим в сетях с резервированием электроснабжения основных потребителей (основной нагрузки). Если этого нет, то следует прибегнуть к технико-экономическим расчетам, сопоставив стоимость внедрения непрерывного контроля с убытками от внезапного отключения электроприемников в случае вывода сети из эксплуатации при снижении сопротивления изоляции [20].

10.6. Изолирующие полы — надежное средство электробезопасности

Опасность токопроводящих полов. Установлено, что около 80 % всех электротравм происходит при однополюсном соприкосновении с токоведущими частями. Опасная для челове-

ка электрическая цепь возникает при этом чаще всего через пол. Вот почему надежно изолирующий пол уменьшает опасность электротравм. Необходимость учета изолирующих свойств пола при оценке электробезопасности была показана еще в 1927 г. С. Еллинеком [22], доказавшим, что токопроводящие полы в производственных помещениях увеличивают электротравматизм. Позднее О. Лёбль описал методику определения удельного сопротивления полов [37].

В конце 30-х годов нами совместно с Г. Е. Бурцевой было впервые выполнено массовое определение удельных сопротивлений полов на подстанциях и станциях системы Ленэнерго. Было доказано, что изолирующие полы позволяют значительно упростить заземляющие системы даже при напряжениях 6 и 35 кВ. Позднее Г. Е. Бурцева предложила некоторые коэффициенты для расчета заземлений с учетом электропроводности полов [16].

Начиная с этого времени, идея об использовании электроизолирующих полов постепенно развивается. К сожалению, технически она реализовалась не в создании непосредственно изолирующего пола путем подбора соответствующих материалов, а в применении дополнительных изолирующих устройств, укладываемых на полу. К ним следует отнести деревянные решетки на изоляторах. Такие решетки устанавливались в помещениях подстанций, распределительных устройств станций и т. д.; изоляторы обеспечивали изоляцию решеток от проводящего пола. Еще более широкое распространение получили изолирующие коврики. Ими стали пользоваться не только в электромашинных помещениях. Но половинчатость подобных решений очевидна. В известной степени ее можно оправдать отсутствием данных об электрофизических характеристиках существующих строительных материалов и отставанием в создании материалов, специально предназначенных для изолирующих полов. Необходимость в таких материалах нарастает и в промышленности, и в быту.

Резко возросшая бытовая нагрузка привела к необходимости повысить напряжение до 380/220 В при заземленной нейтрали. Дополнительным эффективным защитным средством в кухнях, где стали широко применять электроприборы, в ванных комнатах, где обычно располагают стиральные машины, и в прочих помещениях, где пользуются швейными машинами, пылесосами и другими приборами, несомненно, мог бы быть изолирующий пол. Но в то же время устройство изолирующих полов усложнилось. Строители практически перестали применять деревянные перекрытия, значительно увеличилось использование железобетонных конструкций, по-

вышающих проводимость по отношению к земле. Отсутствие надежно изолирующих полов является одной из причин увеличения бытового электротравматизма.

Приведем несколько примеров.

Пример 10.4. Гр. Н. была смертельно поражена электрическим током на кухне в момент включения электроутюга, фазовый провод которого соприкасался с корпусом утюга. Электрическая цепь возникла через тело пострадавшей и влажный пол.

Пример 10.5 Гр. Л. сушила волосы феном, провод которого был плохо изолирован; она коснулась рукой этого провода и была поражена током.

Пример 10.6. Гр. П. погиб, прикоснувшись к кожуху газовой плиты. Напряжение, которое вызвало его смерть, возникло между полом и корпусом плиты вследствие того, что газопровод касался оголенного места на электрическом проводе.

Пример 10.7. В одной из квартир был заземлен корпус стиральной машины. Гр. У. поставил на крышку машины электроплитку и начал кипятить в кружке воду для бритья. Снимая одной рукой кружку с плитки, он другой рукой коснулся никелированных частей машины, получил удар током и погиб. Оказалось, что при нагреве спираль плитки выгнулась и коснулась дна кружки. Если бы корпус стиральной машины не был заземлен, а эмаль стиральной машины была бы в исправном состоянии, смертельного поражения, возможно, не произошло бы, ибо пол в ванной комнате, где все это происходило, был покрыт линолеумом.

Требования к полам. На основе анализа приведенных примеров можно сделать вывод: как можно больше изоляции! Металлические трубопроводы (газовые, водопроводные), металлические конструкции должны быть надежно окрашены, поскольку изолировать их от «земли» практически невозможно. Корпуса любого электрооборудования должны быть либо выполнены из изоляционных материалов, либо надежно окрашены. И, конечно, важно, чтобы полы были из изоляционных материалов. Настало время предъявить к строителям электротехнические требования, выполнение которых обеспечивало бы электробезопасность в сооружаемых ими зданиях. Во многих случаях именно они — строители (не электрики) — могут резко повысить надежность эксплуатации электрооборудования и сетей. Но для этого надо знать, в чем эти требования заключаются и на что они должны распространяться. Особенно необходимы требования к удельному объемному электрическому сопротивлению материала пола и окраски и требования к суммарному поверхностному электрическому сопротивлению окраски или любого иного покрытия.

Для расчета возьмем значение начального осязательного установившегося тока, равное 1 мА. Примем электрическое сопротивление тела человека условно 600 Ом/см^3 . Это сопротивление соответствует очень неблагоприятному случаю соприкосновения, а именно соприкосновению с токоведущими частями не менее $100\text{—}150 \text{ см}^2$ влажной кожи. Электрическое сопротивление обуви и одежды, оказавшихся в цепи замыкания, примем равным нулю, а емкостную составляющую их сопротивления не будем учитывать. Тогда ток в цепи через тело человека при однополюсном замыкании в сети с заземленной нейтралью будет обусловлен в основном электрическим сопротивлением тела человека и электрическим сопротивлением пола. Сопротивление заземления в нейтрали сравнительно с ними очень мало, и им вполне можно пренебречь. Также пренебрежем и емкостной составляющей электрического сопротивления пола. Как будет показано далее, значение этой составляющей мало и на значение установившегося тока в сети напряжением ниже 1000 В оно влияния не оказывает. Методика определения электрического сопротивления пола описана в работе [41]. Пользуясь ею, можно установить критическое удельное сопротивление пола, при котором изоляция пола обеспечивает безопасное соприкосновение человека с токоведущими частями. Оно равно $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Прежде чем закончить изложение общих соображений, связанных с определением электротехнических требований к полам, укажем, что начавшееся в 1960 г. массовое применение изолирующих полов выявило одну их особенность, которая ограничивает верхний предел их удельного сопротивления. Появились жалобы (преимущественно от домохозяек) на то, что прикосновение к газовой аппаратуре и к водопроводным кранам в кухнях вызывает при некоторых условиях резко выраженный «болевого укол». Вначале возникло предположение, что причиной этих «уколов», как и ранее, было появление напряжения между полом, стеной и металлическими предметами, соединенными с землей, ввиду повреждения изоляции квартирной электросети.

Тщательное обследование показало, однако, что в данных случаях у «уколов» током иное происхождение. Дело в том, что во всех помещениях, в которых они наблюдались, полы были покрыты линолеумом и сохраняли сухость, т. е. были хорошо изолирующими. Как показали измерения, удельное сопротивление полов в этих случаях превышало $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Длительное передвижение по таким полам, сопровождавшееся трением обуви о линолеум, приводило к накоплению зарядов на теле человека, которые, разряжаясь при сопри-

косновении с металлическими предметами, имеющими связь с землей, и вызывали упомянутые «уколы». Поэтому следует, пожалуй, рекомендовать оптимальное значение удельного сопротивления в пределах не более 10^5 — 10^6 Ом·м при минимальной электризующей поверхности. Поверхностное сопротивление должно превышать 1 МОм·м при толщине заземляющей полосы в пределах 10 см. Выполнение таких относительно нежестких требований обеспечивается даже обычной масляной краской.

Характеристика полов. Итак, сухой пол может быть надежной защитой человека при однополюсном замыкании. Исключением является цементный пол, который даже в сухом состоянии обладает эквивалентным удельным сопротивлением, находящимся на грани допустимых значений.

Влажность в помещении и вода на полу по-разному снижают удельное сопротивление. Наихудшие результаты получены для ксилолитового пола. В сухом состоянии ксилолитовый пол обеспечивает условия электробезопасности, но малейшее его увлажнение приводит к резкому, на четыре порядка, снижению эквивалентного удельного сопротивления. В связи с тем что в последнее время чистые полы из ксилолита находят все более широкое применение, они были подвергнуты детальному изучению [43, 55]. Выяснилось, что ксилолит из-за наличия в нем хлористого магния, хорошо абсорбирующего влагу, обладает резко выраженной зависимостью сопротивления от влажности. Даже незначительная, обычно присущая помещениям влажность снижает удельное сопротивление ксилолитового пола до значений, при которых не исключена опасность поражения человека электрическим током. В связи с этим пол из ксилолита должен быть отнесен к числу проводящих. Способностью ксилолита абсорбировать влагу следует, по-видимому, объяснить его хорошие гигиенические свойства. Снизить пределы колебания удельного сопротивления и повысить его средние численные значения можно прибавлением к ксилолиту различных гидрофобных добавок, например мылонафта и парафина.

Приведенные в работе [41] численные значения удельных сопротивлений полов из различных материалов и их характеристики недостаточны для оценки защитных свойств полов в установках напряжением выше 1000 В. Во-первых, применяемые для полов материалы обладают резко выраженной нелинейной зависимостью удельного сопротивления от напряжения, а именно с увеличением напряжения сопротивление уменьшается. При широко применяемом напряжении 380/220 В и ниже эта зависимость не имеет существенного

значения, при напряжениях же выше 1000 В она начинает играть большую роль. Во-вторых, при напряжениях выше 1000 В на значение тока, действующего на человека, начинает влиять емкостная составляющая электрического сопротивления пола и среды. Токи в переходных режимах, незначительные по численному значению при напряжениях до 380/220 В, могут достигать опасных пределов при более высоких напряжениях.

Зависимость удельного сопротивления от напряжения и емкостная составляющая электрического сопротивления цепи, возникающей через тело человека, в настоящее время изучены еще мало. Не располагая данными об этой цепи, трудно сделать оценку защитных свойств пола при напряжениях выше 1000 В. Измерения, подробно описанные в работах [42, 43], имели целью облегчить эту задачу.

Особенность измерений на высоком напряжении заключается в том, что при определенных значениях напряжения наступает пробой, с возможностью которого приходится считаться при оценке условий электробезопасности. Исследования показали, что с повышением напряжения сильнее всего уменьшается удельное сопротивление полов из цемента и ксилолита. Пол из ксилолита обладает к тому же малой электрической прочностью и резко выраженной нелинейной зависимостью от времени протекания тока. Даже при небольшой длительности протекания тока удельное сопротивление понижается, а при напряжении около 1,6 кВ, наступает пробой.

Асфальтовые же полы обладают достаточно высоким удельным сопротивлением и с полным основанием могут быть отнесены к категории изолирующих полов. Сравнительно редкое применение этих полов можно объяснить лишь их существенными механическими недостатками. Однако для многих открытых установок, фидерных и понижающих подстанций напряжением 6,0 кВ, где передвижение транспорта практически отсутствует, они вполне подходят.

Критерии безопасности. Основным критерием оценки, может или не может пол считаться защитным средством и если да, то какой именно, является значение его удельного сопротивления. Для установок напряжением ниже 1000 В удельное сопротивление пола, при котором он еще может рассматриваться как полноценное защитное средство, должно находиться в пределах 10^5 — 10^6 Ом·м (этому требованию удовлетворяет большинство из применяемых теперь полов), для установок напряжением выше 1000 В — в пределах 10^7 — 10^9 Ом·м (этому требованию не удовлетворяет ни один из обыч-

ных строительных материалов). Сведения об удельных сопротивлениях полов и представления об их физических свойствах существенно облегчают расчет заземлений и могут объяснить отсутствие травматизма в установках, у которых сопротивление заземления достаточно велико.

Остается рассмотреть изолирующие свойства покрытий на открытых подстанциях.

Вопрос об изолирующих покрытиях на открытых подстанциях возник при расследовании несчастного случая с людьми на 110-киловольтной подстанции. Несчастный случай был вызван шаговым напряжением. В результате разбора этой весьма редкой аварии было предложено в зонах наиболее вероятного и частого передвижения людей на подстанциях устраивать изолирующие дорожки и площадки. В качестве материала для таких дорожек и площадок рекомендован асфальт.

10.7. Режим нейтрали и его значение в решении проблемы электробезопасности

Характерной особенностью электроэнергетики в разных отраслях народного хозяйства последних лет является нарастающее применение повышенных и высоких напряжений — до и свыше 1000 В. Например, такой отраслью является морское и речное судостроение. Решение проблемы электробезопасности начинает зависеть от выбора режима нейтрали в сетях до и свыше 1000 В. Поэтому рассмотрение особенностей режима нейтрали крайне актуально.

В дополнение к терминам, приведенным в первой главе, ниже приводятся некоторые, необходимые для изложения последующего материала стандартные термины и определения.

Согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ) электроустановки в отношении мер электробезопасности разделяются на электроустановки выше 1000 В в сетях с эффективно заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю); электроустановки выше 1000 В в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю); электроустановки до 1000 В с глухозаземленной нейтралью; электроустановки до 1000 В с изолированной нейтралью.

Электрической сетью с *эффективно заземленной нейтралью* называется трехфазная электрическая сеть выше 1000 В, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4. *Коэффициентом замыкания на землю* в трех-

фазной электрической сети называется отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформаторы тока). Глухозаземленная нейтраль — частный случай эффективно заземленной нейтрали.

Изолированной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление. Очевидно, что коэффициент замыкания на землю в электроэнергетической системе (ЭЭС) с изолированной нейтралью должен находиться в пределах 1,4—1,73, а в ЭЭС с глухозаземленной нейтралью он должен быть равным единице.

Замыканием на землю называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с конструктивными частями, не изолированными от земли, или непосредственно с землей. *Замыканием на корпус* называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с их конструктивными частями, нормально не находящимися под напряжением.

Напряжением прикосновения называется напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека. *Напряжением шага* называется напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока замыкания на землю, при одновременном касании их ногами человека. *Током замыкания на землю* называется ток, стекающий на землю через место замыкания.

Защитным отключением в электроустановках до 1000 В называется автоматическое отключение всех фаз (полюсов) участка сети, обеспечивающее безопасные для человека сочетания тока и времени его прохождения при замыканиях на корпус или снижении сопротивления изоляции ниже определенного значения. С учетом описания действия защитного отключения, приведенного в одиннадцатой главе, следует иметь в виду, что защитное отключение должно срабатывать не при прикосновении человека к корпусу элек-

троприемника, находящегося под напряжением, а при появлении на корпусе опасного напряжения.

Несмотря на всю сложность и многообразие механизмов воздействия электрического тока на человеческий организм, о чем говорилось выше, на исход электротравмы влияют время воздействия этого тока, места касания тела человека с токоведущими частями и т. п. Поэтому уменьшение значения тока и времени его протекания через человека должно понизить вероятность смертельного поражения.

Более 75 % аварийных замыканий в ЭЭС приходится на долю однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Поэтому электробезопасность существенно зависит от значения тока ОЗЗ, которое, в свою очередь, зависит от режима нейтрали.

При нормальной работе ЭЭС всегда имеются токи утечки I_{ya}, I_{yb}, I_{yc} на землю через полные проводимости изоляции фаз Y_{yA}, Y_{yB}, Y_{yC} (рис. 10.6, а). Это наиболее распространенная трехпроводная ЭЭС трехфазного переменного тока. Для симметричной трехфазной цепи и симметричной системы ЭДС $E_A = E_B = E_C = E_\phi$ эти токи взаимно компенсируются, и ток в нейтрали равен нулю. ОЗЗ вызывает ток I_3 через проводимость замыкания Y_3 , значение которого зависит от параметров всей цепи.

Расчетная схема (рис. 10.6, а) составлена для случая холостого хода источника. В качестве приемника электро-

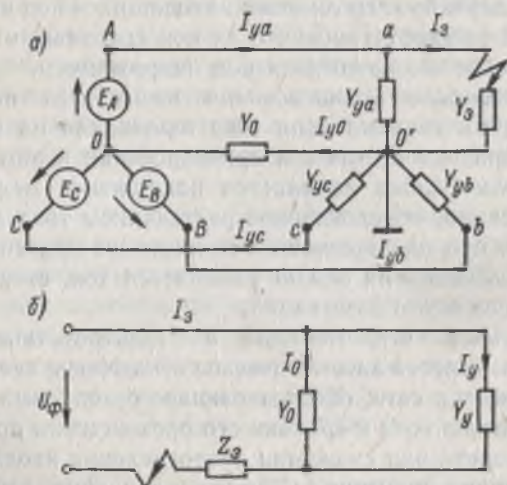


Рис. 10.6. Расчетная и эквивалентная схемы ОЗЗ для любого режима нейтрали: а — расчетная схема; б — эквивалентная схема

энергии рассматриваются полные проводимости фаз изоляции. Эти распределенные проводимости для упрощения будем считать сосредоточенными. На рис. 10.6, б представлена соответствующая эквивалентная схема. Для дальнейшего упрощения примем активные проводимости изоляции равными нулю, а реактивные — чисто емкостными. Y_0 — проводимость нейтрали, значение и характер которой определяют тот или иной режим нейтрали. При $Y_0 = \infty$ имеем глухозаземленную нейтраль, при $Y_0 = 0$ — полностью изолированную. Назовем ее условно «изолированная». Промежуточные значения характерны для эффективно заземленной нейтрали (коэффициент замыкания меньше 1,4), соединенной с землей через низкоомный резистор с $r_0 \ll x_C = 1/(\omega C)$, либо для различных вариантов изолированной нейтрали (по ПУЭ), т. е. соединенной с землей через высокоомный резистор с $r_0 = (1 \dots 2) x_C$ («резистированная») или через дугогасящий реактор (ДГР), настроенный в резонанс с полной емкостью трех фаз относительно земли («компенсированная»). В последнем случае $Y_0 = 1/(\omega L_0) = \omega C$. Здесь x_C — емкостное сопротивление трех фаз ЭЭС относительно земли; L_0 — резонансное значение индуктивности ДГР; C — емкость одной фазы ЭЭС по отношению к земле. Емкостный ток ОЗЗ компенсируется равным по значению и противоположным по направлению индуктивным током ДГР.

Рассмотрим различные режимы нейтрали с точки зрения электробезопасности. Сопротивление замыкания примем активным, т. е. $Z_3 = r_3$. При металлическом замыкании на землю оно может иметь значение от 0 до 20—30 Ом, а при дуговом ОЗЗ 5—50 Ом. При замыкании через тело человека ГОСТ 12.1.038—82 предписывает считать его в большинстве случаев равным 0,85—1,0 кОм. Следует учесть, как уже отмечалось, что правомерность моделирования тела чисто активным сопротивлением, имеющим определенное установленное значение, вызывает сомнения.

Режим с эффективно заземленной нейтралью. В этом случае нейтраль заземляется через малое активное сопротивление r_0 , во много раз меньшее емкостного сопротивления ЭЭС x_C и равное обычно нескольким омам. Емкостное сопротивление практически не оказывает влияния на значение тока ОЗЗ I_3 , в связи с чем

$$I_3 = U_\phi / (r_3 + r_0).$$

Если при металлическом ОЗЗ $r_3 = 0$, то ток зависит только от напряжения и сравнительно небольшого сопротивления нейтрали. Он достаточно велик и позволяет использовать

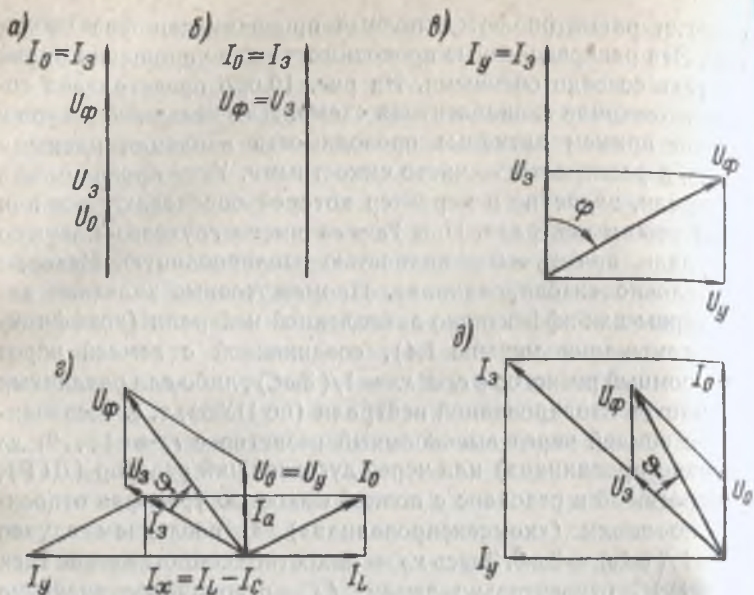


Рис. 10.7. Векторные диаграммы напряжений и токов для различных режимов нейтрали: а — эффективно заземленная; б — глухозаземленная; в — изолированная; д — резистивная

простую релейную защиту от ОЗЗ. Как при высоком, так и при низком напряжении этот ток, безусловно, опасен для жизни человека.

Векторные диаграммы тока и напряжений для эффективно заземленной нейтрали представлены на рис. 10.7, а. Ток замыкания совпадает по фазе с фазным напряжением, равным сумме падений напряжений на сопротивлениях r_3 и r_0 .

Режим с глухозаземленной нейтралью. Из эквивалентной схемы рис. 10.6, б следует, что ток ОЗЗ

$$I_3 = U_\phi / r_3.$$

Для приведенных выше значений r_3 он может достигать даже в ЭЭС напряжением ниже 1000 В весьма больших значений. Для принятой схемы из-за пренебрежения сопротивлениями источника и линии до места замыкания теоретически при $r_3 = 0$ ток I_3 равен бесконечности. В реальных случаях значение тока ОЗЗ определяется фазным напряжением

U_Φ и этим малым фактическим сопротивлением цепи ОЗЗ. Оно того же порядка, что и при двухфазном замыкании.

Поскольку глухозаземленная нейтраль — частный случай эффективно заземленной нейтрали, ей в той или иной степени присущи преимущества и недостатки эффективно заземленной нейтрали.

Заземленные нейтрали применяются в СССР обычно в ЭЭС напряжением 110 кВ и выше и в ЭЭС ниже 1000 В.

Сам факт выведения в помещения обитания человека одного из полюсов электрической цепи с точки зрения электробезопасности, безусловно, нежелателен. Находясь вблизи заземленных предметов (земля, корпуса оборудования, батареи парового отопления, водопроводные трубы и арматура), человек постоянно подвергается опасности электропоражения. Подавляющее большинство бытовых электротравм вызвано именно заземлением нейтралей трансформаторов в системе электроснабжения жилых помещений. Это подтверждается приведенными в книге многочисленными примерами. Настало время предъявить к строителям требование исключить возможность таких электротравм. Векторная диаграмма напряжения и тока для глухозаземленной нейтрали показана на рис. 10.7, б. Ток замыкания совпадает по фазе с фазным напряжением U_Φ .

Режим с изолированной нейтралью. Здесь имеется в виду полностью изолированная от земли нейтраль, электрическое соединение которой с землей возможно лишь через сопротивление изоляции, характер которого мы приняли чисто емкостным. Ток замыкания на землю.

$$I_3 = U_\Phi / \sqrt{r_3^2 + x_c^2}.$$

Из эквивалентной схемы и приведенного выражения ток ОЗЗ определяется включенными последовательно активным сопротивлением замыкания r_3 и емкостным сопротивлением ЭСС x_c . Последнее обратно пропорционально емкости C . Емкость различных ЭЭС зависит от характера носителей этой емкости (источники и приемники электроэнергии, линии электропередачи) и может колебаться в пределах от долей микрофарада до десятков и даже сотен микрофарад. В протяженных воздушных и кабельных линиях электропередачи ее значение определяется главным образом емкостью самой линии, в сравнительно коротких и малоразветвленных сетях (высоковольтные шахтные, судовые сети и т. п.) основными носителями емкости являются источники и электроприемники, а удельный вес кабельной сети в создании емкости относительно невелик и может составлять всего 20—30 %.

При прикосновении человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, ток в электроцепи через его тело будет тем больше, чем больше емкость. Для нулевой емкости емкостное сопротивление $x_C = \infty$ и ток равен нулю. Делаются попытки, исходя из допустимых директивными документами значений токов, определять критические значения емкости ЭЭС различных напряжений, при которых обеспечивается гарантированная электробезопасность. Расчет показывает, что даже при напряжении до 1000 В эти значения оказываются меньше реальных значений, полученных экспериментальным путем на моделях и в натурных условиях.

Преимущества изолированной нейтрали — относительно меньшие токи ОЗЗ и простота реализации этого режима. Недостатки — высокие перенапряжения при дуговых перебегающих ОЗЗ, большая вероятность перехода ОЗЗ в двухфазные короткие замыкания и возникновения феррорезонансных процессов. Изолированные нейтрали используются в СССР в основном в ЭЭС напряжением до 35 кВ включительно при емкостных токах до 30 А.

Векторные диаграммы напряжений и тока для изолированной нейтрали даны на рис. 10.7, в. Фазное напряжение, равное геометрической сумме падений напряжений на активном сопротивлении r_3 и емкостном x_C , отстает по фазе от тока замыкания на угол φ .

Режим с компенсированной нейтралью. Точная настройка ДГР в резонанс с емкостью ЭЭС приводит к полной компенсации установившегося емкостного тока ОЗЗ. Этот ток становится равным нулю, что, казалось бы, обеспечивает гарантированную электробезопасность. Это, однако, не так, потому что в реальных промышленных ЭЭС емкость постоянно изменяется при изменении режима их работы. Диапазон этих изменений может быть достаточно большим и в небольших системах доходить более чем до 90 %.

Для поддержания значения индуктивности ДГР, близкого к резонансному, используется ее ручное или автоматическое регулирование. Применяются ДГР с отпайками, с подмагничиванием сердечника или с изменением воздушного зазора в нем (плунжерные). Несмотря на большое число схем автоматической подстройки ДГР, точной компенсации, как правило, не бывает, и всегда имеется либо недокомпенсация ($I_L < I_C$), либо перекомпенсация ($I_L > I_C$), которая может достигать более 15 %. Ток ОЗЗ

$$I = \frac{U_\phi (x_L - x_C)}{\sqrt{r_3^2 (x_L - x_C)^2 + x_L^2 x_C^2}}$$

Даже при поддержании идеальной резонансной настройки ДГР, что в принципе возможно в малоразветвленных ЭЭС с небольшим, точно известным числом носителей емкости (например, в высоковольтных судовых ЭЭС), ток ОЗЗ не будет равным нулю. Это объясняется в первую очередь наличием в токе замыкания активной составляющей, вызванной активными потерями в ДГР и в изоляции (последние обычно немного меньше потерь в ДГР). При пренебрежении ими векторные диаграммы напряжений и токов будут иметь вид, показанный на рис. 10.7, г.

Существуют схемы компенсации активной составляющей тока ОЗЗ, однако они несовершенны, и этот активный ток может оказаться опасным для человека.

Кроме того, ток ОЗЗ несинусоidalен. Высшие гармоники в составе этого тока в принципе не могут быть скомпенсированы ДГР, настроенным на резонансную частоту основной волны. Они также представляют электро- и пожароопасность.

И, наконец, свободная составляющая тока переходного процесса при ОЗЗ также не компенсируется, медленно затухает и также может вызвать смертельное поражение.

Попытаемся перечислить преимущества и недостатки компенсированной нейтрали, в том числе и не относящиеся прямо к электробезопасности.

Преимущества: почти полное устранение установившегося тока ОЗЗ при точной компенсации, невысоком уровне высших гармоник и незначительном активном токе утечки; практически полное предотвращение перемежающихся дуговых ОЗЗ, и следовательно, больших перенапряжений; снижение вероятности перехода ОЗЗ в двухфазные; бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией; устранение феррорезонансных процессов.

Недостатки: возможность возникновения резонанса напряжений при нормальном режиме работы ЭЭС; возможность возникновения биения напряжений после погасания дуги при неточной компенсации; появление дополнительного свободного медленно затухающего тока ОЗЗ при переходном процессе, вызванного наличием ДГР; невозможность компенсации постоянной составляющей тока ОЗЗ и высших гармоник без применения дополнительных сложных устройств; необходимость автоматической настройки ДГР в резонанс с изменяющейся емкостью ЭЭС.

Компенсация емкостных токов в СССР применяется в ЭЭС 3—35 кВ при значении емкостного тока более 10—30 А в зависимости от вида сети и рабочего напряжения главным образом с целью уменьшения напряжений шага,

уменьшения пожароопасности и вероятности повреждения оборудования установившимися токами ОЗЗ. Эффективность компенсации тем выше, чем больше емкостный ток ОЗЗ. Имеются предложения по использованию компенсации и на низком напряжении, о чем будет упомянуто в последнем параграфе настоящей главы.

Режим с резистированной нейтралью. Если нейтраль соединить с землей через резистор r_0 , сопротивление которого находится в пределах $(1 \dots 2) x_C$, т. е. емкостного сопротивления ЭЭС, то действующее значение тока металлического ОЗЗ всегда будет больше, чем при изолированной нейтрали.

Из эквивалентной схемы ясно, что это справедливо для любых значений r_0 .

При замыкании через сопротивление замыкания r_3 , в том числе и через тело человека, этот ток

$$I_3 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(r_3 + \frac{r_0 x_C^2}{r_0^2 + x_C^2}\right)^2 + \left(\frac{r_0 x_C}{r_0^2 + x_C^2}\right)^2}}$$

Практический интерес представляет известный из литературы факт, что в этом случае при достаточно больших r_3 , — того же порядка, что и сопротивление тела человека, действующее значение тока ОЗЗ может оказаться даже несколько меньше, чем при изолированной нейтрали, если выбрать оптимальное значение

$$r_{0\text{опт}} = \frac{x_C}{2r_3} (x_C + \sqrt{x_C^2 + r_3^2}),$$

полученное из условий минимума тока (единицы миллиампер).

Это оптимальное сопротивление находится в указанных пределах $(1 \dots 2) x_C$, что обеспечивает значительное снижение перенапряжений при дуговых замыканиях по сравнению с изолированной нейтралью.

На первый взгляд снижение тока ОЗЗ по сравнению с изолированной нейтралью может показаться странным, так как резистирование нейтрали добавляет дополнительную активную ветвь, включенную параллельно емкостной, и суммарный ток параллельного соединения будет всегда больше емкостного. Однако в правильности сказанного можно убедиться, если учесть, что полное сопротивление всей цепи, от которого зависит значение тока замыкания, представляет собой геометрическую сумму сопротивлений двух последовательно соединенных участков, а модуль геометрической сум-

мы двух векторов может быть и меньше и больше модулей слагаемых. Сложение в отличие от изолированной нейтрали происходит не под прямым углом.

На рис. 10.7, д показаны векторные диаграммы напряжений и токов.

На электробезопасность положительно влияет уменьшение токов ОЗЗ при переходном процессе, обеспечиваемое резистированием нейтрали. Кроме того, для резистированной нейтрали характерны следующие основные преимущества: практически полное предотвращение перемежающихся дуговых ОЗЗ, и следовательно, больших перенапряжений; снижение вероятности перехода ОЗЗ в двухфазные; предотвращение феррорезонансных явлений. К недостаткам можно отнести усложнение конструктивных решений по сравнению с изолированной нейтралью.

Как следует из изложенного выше, режим нейтрали и соответствующие токи ОЗЗ сами по себе не определяют уровень электробезопасности. В этом смысле очевидным является лишь преимущество рассмотренных трех видов изолированной нейтрали (полностью изолированная, компенсированная и резистированная) перед эффективно заземленной, в особенности глухозаземленной. Выбор режима нейтрали, насколько он вообще возможен в узких рамках регламентирующих его нормативных документов, на практике производится путем рассмотрения упомянутых выше преимуществ того или иного режима, не всегда непосредственно связанных с электробезопасностью. Если их считать достаточными для сравнения, можно сделать вывод, что больше преимуществ и меньше недостатков имеет резистированная нейтраль. Однако по показателю электробезопасности с ней конкурирует компенсированная нейтраль, характеризующаяся значительно меньшими установившимися токами ОЗЗ (малое напряжение шага), в то время как резистированная нейтраль отличается меньшими токами переходного процесса.

Для окончательного выбора оптимального режима нейтрали для каждой конкретной ЭЭС наряду с учетом требований ПУЭ и других нормативных документов необходимо рассматривать сочетание выбранного режима нейтрали с определенным принципом защиты от ОЗЗ, т. е. выбирать систему «нейтраль — защита от ОЗЗ». Это вызвано тем, что электробезопасность зависит не только от режима нейтрали, но и от принятой защиты от ОЗЗ, т. е. от принципа ее действия, чувствительности и быстродействия. Этот вопрос рассматривается в следующем параграфе данной главы.

10.8. Контроль изоляции и защита электросетей

Контроль позволяет выявить не только возникшие внезапно повреждения изоляции, при которых должна срабатывать защита от ОЗЗ, но и постепенное ухудшение изоляции, например в связи с ее старением. В этом случае система контроля, включая световой или звуковой сигнал, выполняет уже другую задачу — задачу предупреждения ОЗЗ. После срабатывания сигнализации обслуживающий персонал может принять меры по устранению неисправности и тем самым предотвратить ОЗЗ. В этой связи особое значение приобретают схемы автоматического селективного контроля, работающие на сигнал. Эти схемы позволяют определить поврежденную отходящую линию и освобождают персонал от поиска повреждения. Применение автоматического селективного контроля изоляции позволяет в ряде случаев отказаться от защиты, действующей на отключение (ЗОУ). Замена защиты от ОЗЗ, работающей на отключение, устройством контроля изоляции допускается ПУЭ для генераторов напряжением выше 1000 В.

Согласно ПУЭ для защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции должна быть применена, по крайней мере, одна из следующих защитных мер: заземление, зануление, защитное отключение, разделительный трансформатор, малое напряжение, двойная изоляция, выравнивание потенциалов.

Все эти меры рассмотрены в других главах. Остановимся несколько подробнее на одной из них — на применении с целью защиты людей от поражения электрическим током малого напряжения.

Малым напряжением называется номинальное напряжение не более 42 В между фазами и по отношению к земле, применяемое в электрических установках для обеспечения электробезопасности.

Как было показано выше, напряжение 42 В не является безопасным для человека. Приводились примеры смертельных поражений при напряжении 12 В переменного тока. Следовательно, здесь можно говорить не об обеспечении электробезопасности, а лишь о повышении ее уровня или об уменьшении вероятности смертельного исхода.

С определенной натяжкой под эту «узаконенную» защитную меру можно подвести известный уже давно, но почему-то не упомянутый ни в ПУЭ, ни в стандарте по электробезопасности принцип автоматического замыкания поврежденной

фазы на землю (АЗФ). Ниже приводится краткое описание этого эффективного средства повышения уровня электробезопасности.

Релейная защита от ОЗЗ, действующая на отключение, даже при очень высоком быстродействии, в принципе не может надежно защитить человека от поражения электрическим током. Если случайное прикосновение к токоведущей части, находящейся под напряжением, произошло на участке между электродвигателем и выключателем, то даже при мгновенном отключении человек может быть поражен электрическим током от ЭДС выбега отключенного электродвигателя. Другим недостатком ЗОУ является отключение потребителя, т. е. перерыв в электроснабжении. Это не всегда допустимо, так как имеются электроприемники, отключать которые нельзя из-за специфики их использования. Примером могут служить электродвигатели гребных винтов буровых судов, производящих бурение в режиме динамической стабилизации на точке бурения. Отключение электродвигателя одного из гребных винтов, осуществляющих стабилизацию с высокой точностью по сигналу бортовой ЭВМ, может привести к серьезной аварии. Этот второй недостаток не имеет прямого отношения к электробезопасности, но, тем не менее, должен учитываться при выборе защиты.

Обоих упомянутых недостатков лишен принцип АЗФ, не требующий отключения потребителя при ОЗЗ. На этом принципе были основаны первые устройства для ликвидации ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Его описание дается, например, в одной из ранних монографий на русском языке по теме настоящей главы авторов Р. Вильгейма и М. Уотерса *.

Устройства АЗФ действуют следующим образом. По сигналу об ОЗЗ, в том числе и о прикосновении, например, от трансформатора напряжения нулевой последовательности (ТННП) включается быстродействующее устройство поиска поврежденной фазы, подающее сигнал на замыкатель, который и осуществляет шунтирование. Устройство поиска поврежденной фазы может реагировать на снижение абсолютных значений напряжения поврежденной фазы при ОЗЗ или на повышение напряжений двух неповрежденных фаз, на сумму или разность фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности (ННП), на угол сдвига фаз фазных напряжений и ННП и т. п. В качестве замыкателей использу-

* Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.: Госэнергоиздат, 1954.

ются в настоящее время быстродействующие вакуумные или тиристорные выключатели. Общее время срабатывания современных устройств АЗФ — единицы миллисекунд, причем большая часть этого времени тратится на поиск поврежденной фазы.

Принцип действия АЗФ, схемы устройств, работающих на этом принципе, его преимущества и недостатки подробно изложены в книге В. И. Шуцкого и др.*

Поскольку замыкатель имеет определенное сопротивление r_3 , ток замыкания снижается после шунтирования не до нуля. Ток через место ОЗЗ, в том числе и через человека, после шунтирования равен

$$I_{\text{пш}} = \frac{3U_{\text{ф}}}{\sqrt{9r_3^2 + (x_c/K)^2}},$$

где $K = r_{\text{ш}} / (r_3 + r_{\text{ш}})$.

При $r_{\text{ш}} = 0$ и $I_{\text{пш}} = 0$ имеет место так называемое эффективное шунтирование. На практике оно осуществляется при $r_{\text{ш}} \neq 0$, но при $r_{\text{ш}} \ll r_3$. Ток $I_{\text{пш}}$ в этом случае близок к нулю.

Часто последовательно с замыкателем включают небольшое добавочное сопротивление $r_{\text{огр}}$. Это делается для выноса опасного потенциала из сети заземления на шунтирующее устройство для обеспечения электробезопасности в случае междуфазного замыкания по цепи «фаза — замыкатель — сеть заземления — фаза». Значение этого сопротивления — единицы ом. Такое шунтирование называется ограниченно эффективным. Если сопротивление заземления и так достаточно мало по сравнению с сопротивлением шунтирующей ветви (сопротивление замкнутых контактов или включенных последовательно нескольких закрытых тиристоров), ограничивающее добавочное сопротивление не ставится, что повышает эффективность шунтирования.

Высокое быстродействие устройств АЗФ обеспечивает при случайном прикосновении человека к находящимся под напряжением токоведущим частям очень высокий уровень электробезопасности.

Принцип АЗФ имеет и недостатки. Основной из них состоит в том, что при ОЗЗ в обмотках источников и потребителей могут возникать дополнительные токи, складывающиеся с током I_3 , вызванные ЭДС замкнутых на землю частей обмо-

* Шуцкий В. И., Жидков В. О., Ильин Ю. Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986.

ток. Существующие устройства АЗФ имеют отстройку от подобных замыканий.

Одной из наиболее опасных в отношении электротравматизма всегда считалась горнодобывающая промышленность. Как следует из данных табл. 2.1, угольная промышленность за период 1951—1952 гг. имела самый высокий процент электротравм. Снижение этого процента в последующие годы вызвано, вероятно, интенсивными усилиями в этой отрасли по обеспечению электробезопасности, в том числе и введением защит от ОЗЗ, совершенствованием технологии, появлением новой техники. Однако и сегодня горнорудная промышленность — одна из наиболее электроопасных.

До последнего времени в горнорудной промышленности основным назначением защиты от ОЗЗ было предотвращение двойных замыканий на землю в различных точках сети, ведущих к возникновению опасных для жизни людей напряжений прикосновения на заземленных корпусах электроустановок и напряжений шага. При этом время отключения сети или присоединения с ОЗЗ в соответствии с главной ролью защиты определялось не требованиями электробезопасности при непосредственном прикосновении к токоведущим частям, а условием (вероятностью) возникновения повторного повреждения изоляции сети у замыкания в другой точке. Считалось, что время отключения основной ступени защиты от ОЗЗ, равное 0,15—0,2 с, для достижения упомянутой цели является достаточным и рациональным. Сейчас в горнорудной промышленности в связи с созданием быстродействующих устройств защиты, в частности АЗФ, впервые ставится другая задача — задача создания защиты, в первую очередь предназначенной для существенного повышения уровня электробезопасности. Электробезопасность при разработке устройств защиты от ОЗЗ выходит на первый план, что означает качественный скачок в проблеме обеспечения электробезопасности с помощью быстродействующей защиты. Этот подход к проблеме уже находит отражение и в других отраслях, близких по условиям электропожароопасности к горнорудной промышленности, например на флоте. В связи с применением высокого напряжения эта проблема там становится все актуальнее, о чем более подробно говорится в последнем параграфе главы.

Выбор определенной системы «нейтраль — защита от ОЗЗ» должен производиться не только исходя из условий электробезопасности, но и с учетом еще ряда факторов. В качестве примера такого комплексного подхода к проблеме может служить определение значений комплексных показате-

Таблица 10.1. Значения комплексного показателя эффективности

Метод снижения опасностей, сопровождающих ОЗЗ				
Изолирование нейтрали	Компенсация емкостных токов	Изолирование нейтрали с ЗОУ	Изолирование нейтрали с АЗФ	Изолирование нейтрали с АЗФ и ЗОУ
$\frac{0,384}{0,324}$	$\frac{0,474}{0,420}$	$\frac{0,274}{0,283}$	$\frac{0,781}{0,773}$	$\frac{0,846}{0,871}$

лей эффективности $\mathcal{E}_i$ различных методов снижения опасностей, сопровождающих ОЗЗ, приведенное в упомянутой работе В. И. Шуцкого и др. применительно к предприятиям горно-рудной промышленности. Значения $\mathcal{E}_i$ получены по весовым коэффициентам электробезопасности, пожаробезопасности, бесперебойности электроснабжения, снижения перенапряжений при дуговых ОЗЗ, снижения вероятности перехода ОЗЗ в двухфазные с учетом улучшения работы выносных заземлителей, ограничения токов двухфазного короткого замыкания, способности обеспечения автоматического восстановления симметричного режима, возможности перевода линий в режим работы «два провода — земля». Весовые коэффициенты установлены на основании метода экспертных оценок.

Значения $\mathcal{E}_i$ приведены в табл. 10.1. В числителе — для стационарных ЭЭС, в знаменателе — для передвижных.

Данные таблицы показывают, что наиболее эффективным является применение изолированной нейтрали с использованием одновременно АЗФ и ЗОУ. В работе не рассматривается режим резистированной нейтрали. Однако в настоящее время разрабатывается экспериментальный образец соответствующего защитного устройства.

Для резистированной нейтрали с АЗФ и ЗОУ можно ожидать еще более высокого, чем для изолированной нейтрали с АЗФ и ЗОУ, значения $\mathcal{E}_i$ за счет весовых коэффициентов снижения перенапряжений и токов переходного процесса.

Различные сочетания режима нейтрали и защиты от ОЗЗ дают различные качественные показатели электробезопасности. Очевидно, что настала пора говорить о требуемом уровне электробезопасности тех или иных производств с учетом их значимости и о разработке вероятностных показателей электробезопасности с учетом конструктивных особенностей ЭЭС, квалификации обслуживающего персонала, режима нейтрали и характеристик защиты. Только такая постановка задачи позволит научно обосновать принимаемые инженерные решения [20].

10.9. Электробезопасность на судах

Согласно табл. 2.1 морской и речной флот можно отнести к наименее электроопасным отраслям народного хозяйства. Это может вызвать не лишнее оснований сомнения, так как судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) имеют особенности, не способствующие электробезопасности. Это, во-первых, наличие металлического корпуса, по которому прокладываются кабельные линии СЭЭС и с которым постоянно контактируют люди; во-вторых, это водная внешняя среда, в том числе и хорошо проводящая морская вода, создающая сырость в помещениях и соленый туман, и, в-третьих, это качка, повышающая вероятность случайных прикосновений к токоведущим частям под напряжением. Очевидное противоречие данных таблицы и приведенных соображений подтверждает высказанное в комментарии к ней пожелание пользоваться ее данными с осторожностью. Все это послужило основанием для выбора морского флота в качестве примера состояния электробезопасности в какой-либо отрасли.

На подавляющем большинстве средних и крупных судов отечественного морского флота применяются трехфазные трехпроводные СЭЭС переменного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц. На мелких судах чаще используется линейное напряжение 220 В, а на самых малых 24—12 В постоянного тока при двухпроводной и однопроводной сети. Трехфазные четырехпроводные системы применяются крайне редко. Для малых судов специального назначения используются СЭЭС частотой 400 Гц.

В дальнейшем для напряжений до 1000 В будем ориентироваться на наиболее распространенные и более электробезопасные трехфазные трехпроводные системы напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

Лишь в последние годы на советских морских судах стало применяться для генерирования и питания мощных потребителей напряжение 6 кВ. Высоковольтные СЭЭС будут рассмотрены отдельно.

Согласно требованиям морского регистра (Регистр Союза ССР) для напряжений до 1000 В в СЭЭС могут применяться изолированные и компенсированные нейтрали. Однако компенсированная нейтраль промышленного применения не получила, в частности, из-за отсутствия промышленного производства компенсаторов.

До недавнего времени применение в СЭЭС напряжением до 1000 В изолированной нейтрали не вызывало сомнений. Емкость СЭЭС была сравнительно невелика, и с точки зрения

электробезопасности изолированная нейтраль являлась оптимальной. Рост мощностей судовых электростанций и увеличение разветвленности СЭЭС привели к соответствующему росту их емкости относительно корпуса. На отдельных крупных судах емкость трех фаз судовой сети достигает сотен микрофарад. Она создается главным образом конденсаторами защиты от радиопомех, которые устанавливаются в основном на шинах распределительных устройств и в магнитных пускателях. При отсутствии конденсаторов (некоторые танкеры, суда финской постройки) суммарная емкость составляет единицы микрофарад и определяется в основном емкостью судовой кабельной сети. При емкостях СЭЭС порядка сотен микрофарад ток металлического ОЗЗ может достигать десятков ампер, что представляет большую пожаро- и взрывоопасность. Емкостное сопротивление мало, и ток через человека определяется электрическим сопротивлением его тела. Он достигает сотен миллиампер и, безусловно, опасен для жизни.

Теоретические и практические вопросы использования на судах компенсированной нейтрали подробно рассмотрены в книге Н. Н. Никифоровского и др. *. Опытная эксплуатация компенсированных СЭЭС показала хорошие результаты. Перспективными направлениями для решения проблемы электробезопасности на судах с СЭЭС 380 В являются отказ от применения конденсаторов защиты от радиопомех и использование компенсации емкостных токов.

ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина) совместно с ВНИИР (г. Чебоксары) для СЭЭС 380 В с изолированной нейтралью разработали устройство АЗФ (УОЗЗ—51Р). Устройство предназначено для существенного повышения уровня электробезопасности.

Возникшая в связи с ростом мощностей СЭЭС необходимость перехода на высокие напряжения выдвигает наряду с другими новыми задачами проблему обеспечения их электробезопасности, которая на высоком напряжении решается значительно труднее, чем на низком.

В настоящее время в СССР эксплуатируется всего пять судов финской постройки с СЭЭС 6 кВ. Это напряжение считается пока наиболее перспективным для судов. Это буровые суда «В. Шашин», «В. Муравленко», «М. Мирчник» и атомные ледоколы «Таймыр» и «Вайгач».

* Никифоровский Н. Н. и др. Электропожаробезопасность судовых электрических систем. Л.: Судостроение, 1978.

Ознакомление с СЭЭС этих судов и эксперименты, проведенные на двух судах с участием автора, показали, что СЭЭС 6 кВ по сравнению с СЭЭС низкого напряжения и с береговыми ЭЭС 6 кВ с точки зрения возможности обеспечения их электробезопасности имеют ряд особенностей. Это — сравнительно небольшая разветвленность и значительно меньшее число потребителей, составляющее, как правило, не более 20 единиц (остальные потребители получают электропитание на низком напряжении); наличие в электростанции нескольких генераторов, предназначенных как для раздельной, так и для параллельной работы на общие шины; значительно меньшая емкость по отношению к корпусу, составляющая единицы микрофард на три фазы, и ее стабильность во времени для каждого потребителя (суммарная емкость определяется в основном емкостью источников и потребителей); небольшой удельный вес кабеля в создании емкости, составляющий менее 30 %; практически полная симметрия емкостей фаз и отсутствие естественного смещения нейтрали, объясняющиеся свойствами кабельной сети, отсутствием конденсатора защиты от радиопомех и однофазных потребителей; большее на порядок, по сравнению с СЭЭС низкого напряжения, активное сопротивление изоляции; лучшие условия эксплуатации сети в нормальных, неаварийных режимах работы судна по сравнению с береговыми сетями, в частности значительно меньший диапазон изменения температуры окружающей среды, меньшее изменение влажности, меньшая вероятность механических повреждений для СЭЭС гражданских судов; отсутствие выключателей у потребителей; возможность точного учета значения и эксплуатационных изменений емкости СЭЭС в зависимости от режима ее работы (это объясняется небольшим числом высоковольтных потребителей и возможностью измерения их емкости вместе с емкостью кабеля до выключателя); отсутствие гальванической связи силовых сетей и цепей управления; электрическая и магнитная экранированность токоведущих частей элементами конструкций распределительных устройств и судовых помещений; малое, по сравнению с сопротивлением «заземлитель — земля», сопротивление корпуса судна, составляющее сотые доли ома.

Перечисленные особенности должны учитываться при рассмотрении всего комплекса вопросов, связанных с электробезопасностью СЭЭС напряжением 6 кВ.

Для эксплуатируемых и строящихся судов с СЭЭС 6 кВ вопросы выбора режима «нейтраль — защита от ОЗЗ» решаются по-разному. На буровых судах типа «В. Шашин» ней-

траль каждого из шести синхронных генераторов 3300 кВ. А соединена с корпусом через резистор сопротивлением 1920 Ом. Максимальная емкость высоковольтной части СЭЭС — около 4 мкФ на три фазы. Применена селективная защита от ОЗЗ с выдержкой времени 1 с для потребителей и 1,5 с — для генераторов. Эта защита рассчитана на предотвращение повреждения электрооборудования при ОЗЗ и на повышение уровня пожаробезопасности. Электробезопасность этой защиты не обеспечивается. За несколько лет эксплуатации на судах не было ни одного случая срабатывания этой защиты, а следовательно, и ни одного ОЗЗ, не было и электротравм в высоковольтной части ЭЭС.

Это обстоятельство подтверждает сделанный выше вывод о том, что высокий уровень электробезопасности может быть обеспечен конструкцией электрооборудования и грамотной его эксплуатацией.

На ледоколах «Таймыр» и «Вайгач» нейтраль каждого из двух синхронных генераторов по 29 МВ·А соединена с корпусом через первичную обмотку однофазного трансформатора, во вторичную обмотку которого включен резистор сопротивлением 4,2 Ом. Коэффициент трансформации 7,3. Максимальная емкость СЭЭС — около 3 мкФ на три фазы. Защита от ОЗЗ подобна защите на буровых судах, но с некоторыми изменениями. Это — чувствительная токовая защита фирмы «Стремберг» (Финляндия), действующая по сигналам трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП), установленных на каждом фидере, и селективно отключающая их при ОЗЗ. Автоматический контроль сопротивления изоляции в высоковольтных частях ЭЭС отсутствует.

Следовательно, на всех этих пяти судах финской постройки используются резистированная нейтраль, защита от ОЗЗ, работающая на отключение, и, кроме того, применены комплексные распределительные устройства (главные распределительные щиты — ГРЩ) со всеми необходимыми для обеспечения электробезопасности блокировками и другими конструктивными особенностями.

На зарубежных судах с высоковольтными СЭЭС, построенных в других странах, используются и другие режимы нейтрали, в том числе и глухозаземленная.

Из рассмотрения различных режимов нейтрали следует, что наиболее высокий уровень электробезопасности обеспечивается резистированной нейтралью с устройствами АЗФ и ЗОУ.

Достаточно высокая электробезопасность достигается главным образом надежностью конструкции высоковольтного

электрооборудования на судах, в частности распределительных устройств. Оценить этот уровень с помощью каких-либо количественных показателей в настоящее время невозможно. Поэтому очень трудно решить проблему о необходимости, в дополнение к достаточно надежной и электробезопасной конструкции, еще и релейной защиты, предназначенной для дополнительного повышения уровня электробезопасности. Видимо, следует разработать какие-то вероятностные показатели, с помощью которых удалось бы оценить удельный вес каждой из мер обеспечения электробезопасности на судах. Во всем остальном на судах как с высоковольтными, так и с низковольтными СЭС используются и другие, общепромышленные защитные меры, но их применение имеет свои особенности.

Правильный выбор режима нейтрали источника питания является одним из основных мероприятий электробезопасности.

Человек может погибнуть от тока в несколько миллиампер в том случае, если электрическая цепь возникнет через аккупунктурные зоны, которые связаны с центральной нервной системой, управляющей дыханием или сердечно-сосудистыми сокращениями. Снижение возникающего через тело человека тока, которое имеет место при правильном выборе режима нейтрали,— путь снижения вероятности поражения.

В заключение можно отметить перспективность резистированной нейтрали для наиболее электропожароопасных производств.

Глава одиннадцатая

ЗАЩИТА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО НА КОРПУСАХ ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1000 В

11.1. Особенности повреждений в установках напряжением ниже 1000 В

Напряжение на корпусах и каркасах оборудования, а также на конструкциях, на которых последнее установлено, появляется в случае полного или частичного повреждения элек-

трической изоляции самого оборудования или в случае повреждения питающих это оборудование кабельных воздушных линий. Последующее развитие аварии после этих повреждений существенно зависит от того, произошло ли повреждение в сетях напряжением ниже или выше 1000 В. В сетях напряжением выше 1000 В повреждения, возникшие в самом оборудовании, как правило, приводят к короткому замыканию с последующим отключением поврежденного оборудования. Подобное происходит и при пробое изоляции в кабельных линиях. В современных сетях электроснабжения поврежденный кабель отключается и электроснабжение переводится на другие кабели. В воздушных линиях далеко не всегда повреждение, особенно в сетях напряжением ниже 35 кВ, приводит к короткому замыканию. Сопротивление места повреждения — упавшего голого провода — особенно в зимнее время иногда ограничивает ток до значения, достаточного для появления сигнала замыкания на землю. В сетях напряжением ниже 1000 В повреждение изоляции во много раз реже сопровождается коротким замыканием, тем более если оно происходит на участках воздушных сетей (сети 380/220 В).

В табл. 11.1 помещены результаты измерений сопротивления заземления голого провода, лежащего на земле, при различных естественных заземлителях, которых касается провод с поврежденной изоляцией. Часть этих данных была опубликована нами еще в 1936 г. [40]. Они подтверждаются результатами, полученными в 1959 г. В. И. Козловым [30], Н. П. Сейма, а также другими авторами.

Н. П. Сейма, например, измеряя сопротивление заземления голого медного провода длиной 35 м, лежавшего на

Таблица 11.1. Сопротивление заземления голого провода, упавшего на землю (длина провода 30 м, сечение 16 мм²)

Характеристика грунта	Погода во время измерений	Среднее значение сопротивления, Ом
Суглинок, слегка покрытый травой	Очень сыро	101
Чернозем, поросший густой травой	Сыро	167
Садовая влажная земля	Сухо	583
Утоптанная щебеночная дорога	»	690
Канавы с водой, чернозем, суглинок	»	28
Асфальтированное покрытие	Сыро	653
Снег при — 12 °С	Сухо	1000

мягкой земле, установил, что оно находится в пределах 120—200 Ом. Когда этот же провод был вдавлен в землю колесами автомашины, сопротивление заземления снизилось до 8—14 Ом; в канаве с водой оно упало примерно до 3 Ом. В. И. Козлов, измеряя в эксплуатационных условиях сопротивление заземления голого провода, упавшего на грунт, в том числе и на грунт, покрытый снегом, получил значения сопротивления заземления для воздушных линий передачи в пределах 100—1000 Ом и выше.

Анализируя результаты измерений можно установить, что сопротивление в месте однополюсных повреждений в воздушных сетях напряжением 380 В только в редких случаях приводит к появлению токов срабатывания защиты.

Несмотря на то что токи однополюсного замыкания на землю иногда весьма малы, прикасаться к лежащему на земле проводу, даже покрытому изоляцией, опасно. Угроза поражения резко возрастает в дождь и в сырость. Источником появления напряжения на изолированном проводе является поверхностная проводимость. Верхний слой изоляции попадает под напряжение чаще всего из-за того, что места соединения обычно недостаточно тщательно изолированы, и переходное сопротивление поврежденного места оказывается единственным сопротивлением, ограничивающим значение тока в цепи через тело пострадавшего.

Пример 11.1. В одном из пригородов Ленинграда во время ветра провод марки ПР-500 диаметром 16 мм² был сорван с изоляторов сети 380/220 В, работающей с заземленной нейтралью, и упал на землю, продолжая находиться под напряжением. Шел дождь, провод лежал в луже, к тому же на проводе (пусть даже вне лужи) имелось плохо изолированное соединение (скрутка). Проходившие мимо школьники решили убрать провод. В момент прикосновения к проводу двое мальчиков были поражены током, один из них погиб.

Отмечены и другие такие случаи.

Пример 11.2. Провод в изоляции со скруткой упал на траву в саду. Женщина, проходившая по саду, взялась за провод рукой и переместила его, чтобы освободить себе путь. Погода была сухая и, хотя провод находился под напряжением, женщина даже не почувствовала «удара». Естественно, что отключения поврежденного участка не последовало и электроснабжение не прекратилось.

В длинных кабельных линиях (400 м и более) большого сечения, защитные устройства которых срабатывают при 250—400 А, участок сети отключается только тогда, когда повреждение происходит в непосредственной близости к источнику питания. Это объясняется тем, что ток замыкания на землю ограничивается сопротивлением места повреж-

дения и сопротивлением петли «провод — земля — нейтраль».

Замыкания в сетях напряжением выше 1000 В носят совершенно иной характер и приводят к иным соотношениям между значениями токов коротких замыканий и действием защиты.

Разный характер последствий развития замыканий в сетях напряжением ниже и выше 1000 В предопределяет условия электробезопасности последних. Дело в том, что при замыкании на землю возникает напряжение относительно земли не только в зоне повреждения, но и на оборудовании источника питания — электростанции, подстанции. В сетях напряжением выше 1000 В это напряжение появляется, как правило, только на время действия защиты. В сетях же напряжением ниже 1000 В, питающих большое количество электрооборудования, корпуса, кожухи и конструкции которого металлически соединены между собой, напряжение относительно земли возникает на всей системе металлически связанных между собой корпусов, кожухов и конструкций. Оно будет, конечно, меньше, чем в сетях напряжением выше 1000 В, но вероятность поражения людей существенно выше, ибо число лиц, могущих оказаться в опасных условиях, во много раз больше, да и время, при котором это напряжение сохраняется, тоже больше. Кроме того, в сетях напряжением выше 1000 В все корпуса электрооборудования, за редким исключением, имеют кожухи из изоляционных материалов, а в сетях напряжением ниже 1000 В такие кожухи встречаются только у некоторых аппаратов. Имеются и другие особенности.

Для защиты людей от напряжения, возникающего на частях оборудования и на конструкциях, на которых оно монтируется, при повреждении изоляции применяют три основных мероприятия: защитное заземление (в сетях ниже и выше 1000 В), зануление (только в сетях ниже 1000 В) и защитное отключение (преимущественно в сетях ниже 1000 В).

11.2. Защитное заземление

Физическая сущность заземления как средства защиты. Заземление — средство, предназначенное для защиты от поражения напряжением, которое вследствие повреждения изоляции возникает на поверхности металлических или других электропроводящих элементов или частей оборудования,

не входящих в его электрическую цепь, т. е. нормально не находящихся под напряжением. Электробезопасность достигается применением системы заземляющего устройства, под которой понимается совокупность заземлителей и заземляющих проводников. Заземление применяют в сетях любых напряжений.

Заземлить, т. е. применить такое заземляющее устройство, означает металлически надежно, с помощью проводов, не имеющих изоляции, или шин, соединить с заземлителями подлежащие защите элементы или части оборудования.

Заземлители делятся на естественные и искусственные. Под естественными заземлителями понимаются любые, имеющие достаточную и постоянную поверхность соприкосновения с землей металлические предметы, попутное использование которых для целей заземления не вызывает нарушения их нормальной работы. Естественными заземлителями могут быть металлические трубопроводы, имеющие проводящие верхние противокоррозионные или теплоизоляционные покрытия, элементы конструкции здания, емкости для хранения воды, металлические оболочки кабелей и т. д. В качестве естественных заземлителей нельзя использовать емкости и трубопроводы, содержащие взрыво- и пожароопасные жидкости и газы.

Искусственными заземлителями называют любые металлические предметы, имеющие достаточную и постоянную поверхность соприкосновения с землей, специально закладываемые в землю для целей заземления. Как правило, в качестве таких заземлителей используются стальные трубы длиной 1,5—2,5 м и диаметром 25—50 мм или какие-либо другие металлические предметы.

Ранее считалось, что в процессе эксплуатации качество заземлителей ухудшается. Наши наблюдения, а также исследования, проведенные Н. А. Коржем, показали иное. Ржавчина, образующаяся на поверхности заземлителя, а также поселяющиеся на ней так называемые железные бактерии увеличивают поверхность заземлителя, а заодно и активизируют ее. В результате сопротивление заземлителя снижается и заземление становится более эффективным.

Срок службы заземлителей достигает 25—30 лет. В этом можно убедиться, взглянув на рис. 11.1, где показан заземлитель, извлеченный из земли для контрольного осмотра после успешной 20-летней эксплуатации. Конечно, соединительные шины заземлителей, если их делать диаметром всего 20—25 мм, могут уже через 10—15 лет эксплуатации в химически агрессивном грунте полностью разрушиться.



Рис. 11.1. Заземлитель, разъеденный ржавчиной и извлеченный из земли после 20-летней успешной эксплуатации

Естественные и искусственные заземлители соединяют друг с другом металлической стальной шиной, сечение которой обуславливается значением токов замыкания на землю и механической прочностью заземлителей. Стальной шиной, общей для производственного помещения (цех, мастерская, лаборатория и т. п.), соединяют и подлежащее заземлению электрооборудование. Заземлители, соединенные в земле шиной, соединяют с общей заземляющей шиной производственного помещения соединительными заземляющими шинами или заземляющими проводниками, число которых определяется как расчетом, так и конструктивными соображениями.

Заземляющим проводником называют провод, соединяющий защищаемое оборудование с находящимся в земле заземлителем. В качестве заземляющих проводников можно использовать конструкции зданий, металлические трубопроводы.

Нулевым проводом называют проводник, соединяющий нейтраль трансформатора с землей и служащий обратным проводом в трехфазной или однофазной сети. В системе постоянного тока нулевым проводом называют средний провод, обычно заземляемый.

Замыканием на землю называют случайное электрическое соединение металлических частей оборудования, находящихся под напряжением, непосредственно с землей.

Замыкание, возникающее вследствие повреждения изоляции непосредственно в машинах, аппаратах или иных устройствах, называют замыканием на корпус. В значительном большинстве случаев оно представляет собой короткое замыкание, сопровождающееся отключением электроприемника от сети питания.

Основным элементом всякого заземляющего устройства является заземлитель. Качество заземлителя определяется значением сопротивления заземления и изменением напряжения относительно земли.

Под сопротивлением заземления заземлителя понимают сопротивление между заземлителем (у места соприкосновения с грунтом) и землей. Полным сопротивлением заземления системы заземлителей считают соответственно сопротивление между заземляющей шиной и «землей». Под «землей» в данном случае понимается поверхность грунта вблизи заземлителя, потенциал которой равен нулю. Обычно такая поверхность находится в 15—20 м от простейшего заземлителя (одна-две трубы или одиночные шины).

Значение сопротивления заземления определяется как отношение полного напряжения относительно земли к полному току замыкания на землю. Под полным напряжением относительно земли понимается напряжение, возникающее в цепи тока замыкания на землю между заземлителем и землей (зона нулевого потенциала). Напомним, что напряжением прикосновения называют напряжение, возникающее в цепи тока между заземлителем и поверхностью пола. Нормируется напряжение прикосновения на расстоянии 0,8 м от защищаемого оборудования. Под напряжением шага понимают напряжение, возникающее в цепи тока замыкания на землю на поверхности земли. Нормируется напряжение шага между двумя точками на поверхности, находящимися на расстоянии 0,8 м одна от другой.

Для открытых подстанций, переключательных пунктов и изолированных одиночных электроприемников приведенные определения достаточно точно отвечают существу явления. Для производственных же помещений, особенно размещен-

ных в многоэтажных зданиях, напряжение относительно земли можно принимать с достаточной достоверностью равным напряжению прикосновения между заземляемым оборудованием и металлической пластиной, положенной на поверхность пола на расстоянии 0,8 м от заземляемого оборудования.

Физическая сущность этой защиты иллюстрируется рис. 11.2, где слева изображен любой трехфазный электроприемник (электродвигатель, трансформатор, прибор), справа — источник электроэнергии, нейтраль которого наглухо заземлена. На этом же рисунке представлена зависимость изменения напряжения U от L , где L — расстояние между заземлителем и зоной нулевого потенциала (землей).

Представим себе, что изоляция электроприемника повредилась, в результате чего токоведущая часть его электрически соединилась с незаземленным металлическим корпусом технологического оборудования или защитного устройства. Коснувшись такого корпуса или же поддерживающей его конструкции, оставленной без заземления, человек оказывается под напряжением прикосновения, значение которого равно фазному или близко к нему. При некотором отличии этого напряжения от фазного возникает падение напряжения

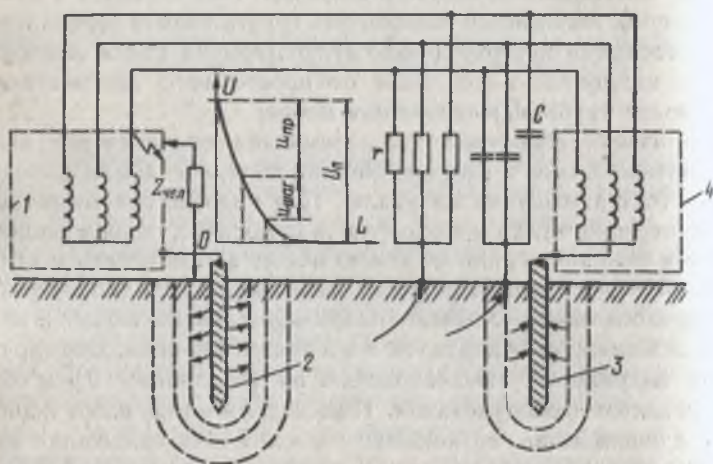


Рис. 11.2. Принципиальная схема заземления для защиты от напряжения, возникшего на корпусе оборудования

1 — электроприемник; 2 и 3 — заземлители; 4 — источник электроэнергии; $Z_{\text{чел}}$ — полное сопротивление тела человека; $U_{\text{п}}$ — полное напряжение относительно земли; $U_{\text{пр}}$ — напряжение прикосновения; $U_{\text{шаг}}$ — напряжение шага; r — активное сопротивление изоляции; C — емкость провода относительно земли

ва переходных сопротивлений между обувью и землей, а также распределение потенциала.

Таким образом, сущность защиты с помощью устройства заземлений заключается в создании такого заземления, которое обладало бы сопротивлением, достаточно малым для того, чтобы падение напряжения на нем (а именно оно и будет поражающим) не достигало значения, опасного для человека. В поврежденной цепи необходимо обеспечить такое значение тока, которое было бы достаточным для надежного срабатывания защитных устройств, установленных на источнике питания.

Нормирование сопротивления заземления. В производственных условиях заземляющее устройство представляет собой сложнейшую систему естественных заземлителей (конструкции здания, арматура фундаментов, водопроводная система и т. д.). Значение напряжения, под которым может оказаться человек, аналитически определить невозможно — оно будет зависеть от множества факторов, и в частности от соотношения сопротивления цехового заземления и сопротивления заземления источника электроэнергии. Если численные значения сопротивлений обоих заземлений будут невелики, то на значение напряжения будет влиять соотношение параметров сети и ряд других факторов. Вот почему для сетей напряжением ниже 1000 В, как показывает многолетний опыт работы многочисленных предприятий, нет необходимости определять точное численное значение сопротивления заземления. Это определение к тому же осложняется трудностями учета всех естественных заземлителей, число которых по меньшей мере двузначно. Поэтому «Правила устройства электроустановок» ограничиваются установлением лишь верхнего численного значения допустимого предела сопротивления заземления. Параграф 1-7-41 этих Правил гласит: «Сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 4 Ом» (речь идет об установках напряжением ниже 1000 В.— В. М.). «При мощности генераторов и трансформаторов 100 кВ·А и менее заземляющее устройство может иметь сопротивление не более 10 Ом». Дальнейшая детализация, приведенная в этом параграфе, несущественна.

Эти численные значения сопротивления заземления обеспечиваются наличием естественных заземлителей. Проанализировав многие тысячи электротравм, мы не обнаружили ни одного случая, причиной которого было бы большое значение сопротивления заземления заземлителей. Несчастные случаи «по вине заземления» (их было не так уж много) вызывались либо большим сопротивлением в контакте «заземляющая

шина — корпус оборудования», либо обрывом заземляющего провода.

Исследования и инженерные решения. Проблеме заземления посвящено большое число работ, о чем свидетельствует библиография, составленная Н. А. Коржем. Особо следует отметить работы М. Р. Найфельда [47], Л. Б. Ослона [54], А. И. Якобса [83], а также В. Антони [85], Дж. Бурнета [88], Р. Мюллера [108] и К. Волковинского [114]. Много нового для расчета, проектирования и создания надежных заземлений дали сообщения, сделанные на уже упоминавшемся Международном симпозиуме в г. Вроцлаве (1972 г.). Г. Маркевич (Польша) указал на нем, что одной из особенностей сложных заземлителей является перераспределение шаговых напряжений и напряжений прикосновения. Подобное наблюдалось и нами.

Пример 11.3. На торфоразработках под Ленинградом производилась укладка труб газопровода в канаву с сухим песчаным основанием. В 50 м от места укладки строительный автокран оборвал провод линии электропередачи напряжением 380/220 В. Провод упал на еще не изолированную трубу, и рабочие-трубоукладчики оказались под напряжением. Двое из них тяжело пострадали.

Учитывая все эти наблюдения, симпозиум придал защите от «выносного напряжения» важное значение.

В свое время автор этой книги добился десятикратного устойчивого снижения удельного сопротивления заземления заземлителей, используя на каждый трубчатый заземлитель по 2000 кг поваренной соли, смешанной с проводящим грунтом или глиной. К. Волковинский и Домбровский (Польша) своим докладом на симпозиуме вновь обратили внимание на проблему искусственного снижения электрического сопротивления грунта. Добавляя ангидрид гипса в грунт с удельным сопротивлением 5—9 кОм·м, они добивались пятикратного снижения сопротивления заземления заземлителей. Это снижение было достаточно устойчивым — оно сохранялось на протяжении 6 лет.

К сожалению, многие важные вопросы, касающиеся заземления, остались и после симпозиума нерешенными. К их числу относятся: а) метод определения геоэлектрической структуры электропроводности грунта; б) метод расчета выноса потенциала протяженными заземлителями с территории подстанции; в) способ оценки влияния электропроводности грунта на значение выноса потенциала; г) выбор исходных данных для расчета сложных заземлителей.

Из инженерных решений в области заземления наиболее интересной остается работа Фрейта (ГДР) по закладке стальных шин шириной примерно 100 и 70 мм в середину элементов железобетонных фундаментов. Концы шин выводятся наружу из элемента фундамента и свариваются друг с другом в процессе монтажа. К местам сварки подключают вертикальные стояки, идущие в производственные помещения, где их присоединяют к внутренней заземляющей системе.

В 1978 г., а затем в 1982 г. в СССР успешно прошли две конференции на тему «Заземление тока в земле и электробезопасность в народном хозяйстве». В последней из этих конференций, проведенной в Харькове, участвовало свыше 150 специалистов, много лет посвятивших изучению, проектированию и эксплуатации заземлений. Конференция признала необходимым широко использовать естественные заземлители, в первую очередь трубопроводы (кроме транспортирующих взрыво- и пожароопасные продукты), а также арматуру зданий, и особенно их фундаментов. Названы организации, которые в состоянии разработать с помощью ЭВМ расчетные модели, допускающие совместное использование естественных и искусственных заземлителей.

Конференция признала перспективным искусственное снижение удельного сопротивления грунтов (в том числе и в зоне вечной мерзлоты), особенно при работе заземляющих устройств в импульсном режиме. Отмечена необходимость составления характеристик заземления при сдаче сооружений в эксплуатацию. Указана целесообразность увеличения выпуска контрольных приборов, в том числе мегомметров, ускоряющих процесс измерений при повышении достоверности их результатов. Нам остается подчеркнуть необходимость выполнения этих рекомендаций.

11.3. Зануление

Физическая сущность зануления как средства защиты. Из действующих правил термин «зануление» исключен и заменен понятием «заземляющая система с нулевым заземленным проводом». Основанием к такому исключению, видимо, было нежелание выделять из общего понятия «заземление» относительно частное определение. Однако в обиходе энергетиков понятие «зануление» осталось. Содержится оно и в ГОСТ 12.1.009—76 «Электробезопасность. Термины и определения». Можно дать такое определение этого способа защиты.

Занулением называется защитное мероприятие, применяемое только в сетях с заземленной нейтралью напряжением

ниже 1000 В, предназначенное для защиты людей и животных от напряжения, возникающего на металлических частях оборудования, нормально не находящихся, но могущих оказаться под напряжением при тех или иных повреждениях изоляции, и заключающееся в создании в поврежденной цепи значения тока, достаточного для надежной работы защиты. Занулить — это значит металлически (электрически) надежно соединить подлежащие защите части оборудования с нулевым проводом.

Зануление требует применения заземлителей для присоединения к ним нулевого провода. Но назначение этих заземлителей иное, чем при заземлении.

Физическая сущность защиты в системе зануления поясняется рис. 11.3, на котором представлена принципиальная схема зануления с одним электроприемником. На рисунке показано соединение нейтрали источника электроэнергии с корпусом электроприемника; приведена и диаграмма, характеризующая изменение напряжения относительно земли, возникающего при повреждении изоляции в двух случаях: нулевой провод имеет единственное заземление у источника

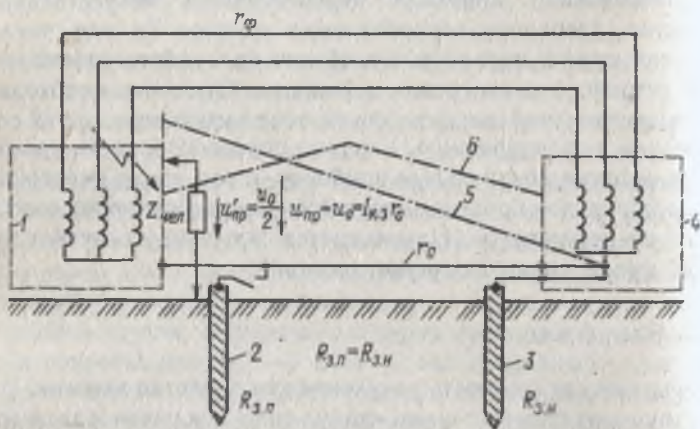


Рис. 11.3. Принципиальная схема зануления для защиты людей от напряжения, возникающего на корпусе оборудования при повреждении изоляции

1 — электроприемник; 2 и 3 — заземлители; 4 — источник электроэнергии; 5 — распределение $U_{пр}$ при отсутствии повторного заземлителя; 6 — то же при его наличии; $Z_{чел}$ — полное сопротивление тела человека; $R_{з.н}$ — сопротивление повторного заземлителя; $R_{з.н}$ — сопротивление заземлителя нейтрали генератора; U_0 — падение напряжения на нулевом проводе; $U_{пр}$ — падение напряжения при отсутствии повторного заземлителя; $U'_{пр}$ — то же при его наличии

электроэнергии и нулевой провод имеет повторное заземление у электроприемника.

В первом случае напряжение прикосновения увеличивается в сторону электроприемника и достигает максимального значения у его корпуса; численно это напряжение будет равно падению напряжения на нулевом проводе при коротком замыкании, возникающем в электроприемнике между фазным и нулевым проводами. Если сопротивление фазного провода будет равно сопротивлению нулевого провода r_0 , то напряжение прикосновения в момент короткого замыкания на корпусе электроприемника при отсутствии повторного заземлителя будет равно половине фазного. Если же сопротивление нулевого провода будет больше сопротивления фазного, то напряжение прикосновения будет больше половины фазного.

Уменьшить напряжение прикосновения можно двумя путями: увеличив сечение нулевого провода или устроив повторные заземлители.

Таким образом, физическая сущность защиты посредством системы зануления заключается в снижении напряжения прикосновения путем уменьшения сопротивления нулевого провода и перераспределения напряжения прикосновения между основным (нейтраль трансформатора) и повторным (у электроприемника) заземлителями с помощью повторных заземлителей, численные значения сопротивлений которых роли не играют.

Требования, предъявляемые к системам зануления. Для дальнейшего изложения необходимо напомнить требования ПУЭ, ПТЭ электроустановок и ПТБ, касающиеся этого раздела. Они таковы.

Проводимость нулевого провода должна быть не менее 50 % проводимости фазного провода. На воздушных линиях через каждые 250 м, а также на концах линии и ответвлениях длиной более 200 м должны быть заземлители нулевого провода вне зависимости от материала опор. Сопротивление заземления каждого из этих повторных заземлителей должно быть не более 10 Ом, а в сетях, в которых сопротивление заземления нейтралей генераторов и трансформаторов принято равным 10 Ом, оно может составлять 30 Ом. Сопротивление заземляющего устройства из повторных заземлителей должно быть 10 Ом, основного — 4 Ом.

Ток короткого замыкания $I_{к.з.}$, возникающий в сети, должен в три раза превышать номинальный ток ближайшей плавкой вставки предохранителя или номинальный ток расцепителя автоматического выключателя, имеющего характеристику, обратнoзависимую от тока.

При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель (отсечку), проводник должен быть выбран таким образом, чтобы в петле «фаза — нуль» был обеспечен ток короткого замыкания, равный току уставки мгновенного срабатывания, умноженному на коэффициент, учитывающий разброс значений (по заводским данным), и на коэффициент запаса 1,1.

Перейдем к рассмотрению системы зануления в плане реализации требований к ней.

В нынешней редакции ПУЭ, ПТЭ и ПТБ нет прямых указаний на допустимое значение напряжения на нулевом проводе; все же, исходя из приведенных в правилах значений других параметров, можно принять его не меньше, но и не больше 125 В.

Поскольку в отношении значения потенциала на нулевом проводе сделаны ограничения, необходимо рассмотреть, как на его распределение влияют местоположение и число заземлителей нулевого провода.

Итак, в соответствии с приведенными выше требованиями ПУЭ выбранное сопротивление нулевого провода при заданном сечении фазного провода должно удовлетворять условию (рассматривается случай применения плавких вставок)

$$I_{к.з} = U_c / Z = 3I_{ном}, \quad (11.1)$$

где U_c — напряжение сети; Z — полное сопротивление петли «фазный провод — нулевой провод»; $I_{ном}$ — номинальный ток.

Это требование преследует цель — обеспечить отключение поврежденного участка. Поскольку выше принято, что значение напряжения на нулевом проводе (и, следовательно, на всех тех элементах оборудования, которые с ним соединены) не должно превышать 125 В, необходима проверка выполнения этого условия, так как если защита почему-либо откажет, то в сети повышенное напряжение на зануленных частях оборудования может существовать долго, нарушая условия безопасности. В связи с тем что в этом случае нет протекания тока в землю (см. рис. 11.2), через нулевую точку (в предположении исправности изоляции нейтрали) ток тоже не протекает, и потому ее потенциал по отношению к земле равен нулю. Между нулевой точкой и местом повреждения и одновременно в месте повреждения по отношению к земле возникает разность потенциалов, численно равная падению напряжения в нулевом проводе. Ее значение $u_0 = I_{к.з} r_0$, а так как $I_{к.з} = U / (r_0 + r_\phi)$, то

$$u_0 = U \frac{1}{1 + r_0/r_\phi} \quad (11.2)$$

При равенстве сопротивлений* нулевого и фазного проводов напряжение прикосновения у электроприемника для сети 380/220 В будет равно 110 В. Уменьшения значения напряжения относительно земли в этих условиях можно достичь дополнительным заземлением нулевого провода прежде всего у электроприемника. Возникает цепь, как бы шунтирующая нулевой провод. Сопротивление этой цепи значительно больше сопротивления нулевого провода, и поэтому на значении тока, текущего по нулевому проводу, эта цепь существенно не отразится. Однако напряжение относительно земли уменьшится. Если сопротивление повторного заземлителя (одного или системы) будет равно сопротивлению заземления нейтрали трансформатора, то напряжение прикосновения относительно земли будет равно половине падения напряжения на нулевом проводе. Соответственно изменяя соотношение сопротивлений повторного и основного заземлителей, можно изменять значения напряжения прикосновения на корпусе электроприемника и на корпусе питающего трансформатора. Сопротивление участка цепи от места повреждения до нейтрали трансформатора становится меньше сопротивления фазного провода. А это означает, что в случае повреждения происходит перераспределение напряжения, при котором большее значение приходится на падение напряжения в фазном проводе. Условия безопасности при соприкосновении человека с корпусом оборудования, у которого повреждена изоляция, улучшаются.

Вероятность соприкосновения с металлическими частями оборудования, нормально не находящимися, но могущими оказаться под напряжением при повреждении изоляции, в цеху несравнимо больше, чем в помещении трансформаторной подстанции. Дело в том, что трансформаторную подстанцию обслуживают люди электропрофессий, имеющие определенные навыки и соответствующую квалификационную группу по технике безопасности. Цеховое же электрооборудование обслуживают рабочие основного технологического процесса, часто менее подготовленные в отношении электробезопасности. Да и число рабочих основного производства значительно

* Принято, что сопротивления являются активными. Такое допущение приемлемо, поскольку рассматриваются лишь качественные, а не количественные характеристики системы.

больше, в то время как помещение трансформаторной подстанции посещается редко и объем работ в нем при нормальной эксплуатации ограничен, причем применение дополнительных защитных средств в помещении трансформаторной подстанции просто и доступно. В силу сказанного уровень электробезопасности электрооборудования основного производства должен быть особенно высоким.

Идеализированную схему зануления, показанную на рис. 11.3, можно создать лишь в искусственных условиях. Практически же на обоих концах — у электроприемника и у трансформатора — имеется большое число естественных заземлителей. К ним относятся: арматура сооружений, строительные балки, конструкции фундаментов, трубопроводы, металлические оболочки кабелей и многое другое. Изолировать корпуса электрооборудования невозможно. Сопротивление заземления этих естественных заземлителей отражается на сопротивлениях заземления основных и повторных заземлителей, а учесть это влияние сложно и трудно. В то же время соотношение их сопротивлений заземления обуславливает значение напряжения прикосновения. Возникает неопределенность, являющаяся существенным недостатком зануления. Зато большое достоинство зануления состоит в возможности обеспечить отключение поврежденного оборудования при однополюсном коротком замыкании.

11.4. Об эффективности систем заземления и зануления

В последнее время и в нашей, и в зарубежной литературе отмечается, что заземление и зануление не создают защиты во всех необходимых случаях. Высказывается даже мнение о нецелесообразности зануления и заземления вообще, поскольку эти системы не обеспечивают полной безопасности и экономически невыгодны; им противопоставляется защитное отключение. В японской литературе описаны случаи, когда зануляющие устройства становились причиной пожара.

Нам удалось установить ряд смертельных поражений людей напряжением, появившимся на металлических частях оборудования, нормально не находящихся под напряжением.

Пример 11.4. В связи с изменением технологии потребовалось переместить один из станков. Работа была поручена трем рабочим. Они приступили к ней, не отсоединив заземляющей шины и не сняв напряжения на шите, вследствие чего кабель, питавший станок,

находился под напряжением. В первый же момент перемещения один из проводов в пускателе, находившемся под напряжением, освободился от зажимной клеммы и коснулся корпуса. Зануляющая система оказалась под напряжением, а рабочие — в электрической цепи. Двое получили электрический удар, третий погиб. Защитные предохранители сработали правильно. Рабочие находились под напряжением в течение двух секунд. Проверка показала, что корпус станка был надежно соединен с заземляющей шиной. Поражающее напряжение возникло вследствие неблагоприятного для пострадавших соотношения сопротивлений заземления повторного и основного заземлителей.

Пример 11.5. Работница обувной фабрики положила бумажные деньги у раструба местной вытяжной вентиляции. При включении вентиляции деньги оказались втянутыми в вентиляционную трубу. Желая их достать, работница открыла вентиляционный шибер и протянула в трубу левую руку, правой же для упора взялась за шланговый провод, питавший пылесос, временно подключенный к клеммной коробке станка. Пытаясь достать деньги, она натянула провод; от этого одна его жила в клеммной коробке отсоединилась и коснулась металлической крышки, которой в этот момент левой щекой касалась работница. Возникло однополюсное короткое замыкание. Так как клеммная коробка была заземлена, на заземляющей системе появилось напряжение. Работница оказалась в электрической цепи и погибла. Электрометки остались на щеке и плече, которыми работница касалась вентиляционной трубы. Впоследствии удалось установить, что сопротивление между вентиляционной трубой и заземляющей магистралью было меньше сопротивления между корпусом клеммной коробки и той же магистралью, что и привело к появлению опасного напряжения относительно земли, хотя в целом сопротивление заземляющей проводки находилось в пределах допустимых значений.

Крайне любопытен пример, когда перевод системы с изолированной нейтралью на заземленную (и соответственно переход от заземления к занулению) сопровождался повышением пожарной опасности.

Пример 11.6. На одной из ниточных фабрик сеть была переведена с напряжения 220/127 В на напряжение 380/220 В, в связи с чем состоялся переход на заземленную нейтраль. Сразу же начались вспышки отходов волокна, носившихся в воздухе. Вспышки возникали от искр, появлявшихся на металлических конструкциях и деталях ткацких машин, иногда даже электрически между собой и не связанных, при замыкании на землю в сетях за пределами данного цеха. Искры вызывались напряжением, возникавшим вследствие перераспределения напряжений на зануляющей системе, обусловленного различными значениями сопротивления заземления повторных естественных заземлителей. Количество энергии, выделяемое при искре в системе зануления, больше, чем в системе заземления при аналогичном замыкании на землю, вследствие меньшего значения тока.

В связи с изложенным и возникла необходимость изучения распределения напряжений прикосновения в системах

заземления и зануления в различных режимах коротких замыканий.

11.5. Распределение напряжения, возникающего на заземленном или зануленном оборудовании напряжением ниже 1000 В

Начиная исследования в плане оценки распределения напряжений в системе металлических элементов сооружений и корпусов оборудования, надо четко отдавать себе отчет в том, что эта оценка может носить в лучшем случае качественный, а не количественный характер. Слишком уж много трудно учитываемых элементов входит в рассматриваемую систему. Однако и при этом, конечно, не избежать составления исходных эквивалентных схем. При их составлении сделаны некоторые допущения. Перечислим их.

Условимся, что источник электропитания (трансформатор) обладает бесконечно большой мощностью. Рассматривается наиболее неблагоприятный и опасный режим. Заземляющие устройства питающих подстанций принимаются общими для сети напряжением ниже и выше 1000 В. Учитывая, что сопротивление заземления объединенного заземлителя почти на порядок выше сопротивления петли «фазный провод — зануляющая шина», индуктивность петли условно делим пополам. Каждую половину ее соответственно относим к фазному и к зануляющему элементам петли. Такое допущение упрощает схему расчета. Повторное заземление выполнено в одном месте, сопротивление всех заземлителей является активным. И, наконец, последнее допущение — исследование проводится на однофазной, а не на трехфазной сети. Если учесть качественный характер рассмотрения, подобные допущения приемлемы.

Благодаря сделанным допущениям удастся основные параметры зануления исследовать на сравнительно простых эквивалентных схемах.

Рассмотрим наиболее характерные схемы с нулевым проводом:

а) защищаемое оборудование подключено к одиночной заземляющей магистрали и имеет один сосредоточенный повторный заземлитель;

б) защищаемое оборудование подключено к зануляющей системе, в которой имеется ряд повторных заземлителей;

в) зануляющая система одновременно применена в сетях четырех- и трехжильных кабелей.

Напряжение прикосновения в системе с сосредоточенным повторным заземлителем. Здесь возможны два характерных вида соприкосновения пострадавшего с защищаемым оборудованием, корпус которого оказался при аварии под напряжением: а) соприкосновение непосредственно у повторного заземлителя и б) соприкосновение на некотором расстоянии от него.

Как наиболее общий рассмотрим случай, когда соприкосновение пострадавшего с корпусом аварийного оборудования, подключенного к системе зануления, произошло на некотором расстоянии от повторного заземлителя. Эквивалентная схема для такого случая представлена на рис. 11.4.

Введем обозначения: r_ϕ — активное сопротивление фазного провода; $2L$ — индуктивность зануляющей петли; r_0 — активное сопротивление нулевого провода; R_3 — сопротивление заземления у трансформатора, имеющего заземленную нейтраль; $R_{з.п}$ — сопротивление заземления повторного сосредоточенного заземлителя; r_1 — активное сопротивление зануляющей проводки на участке зануляющей сети от аварийного оборудования до повторного заземлителя; L_1 — индуктивность стальной шины на этом участке. Напряжение прикосновения

$$\dot{u}_{пр} = \frac{Z_1(Z_2 + Z_3) + R_{з.п}Z_4}{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_3Z_4} \dot{U}, \quad (11.3)$$

где $Z_1 = r_\phi + r_1 + j\omega(L + L_1)$; $Z_2 = r_0 + j\omega L$; $Z_3 = R_3 + R_{з.п}$; $Z_4 = r_1 + j\omega L_1$.

Представляет интерес зависимость $u_{пр}$ от отношения сопротивления заземления трансформатора к сопротивлению заземления повторного заземлителя. Эта зависимость выражена уравнением

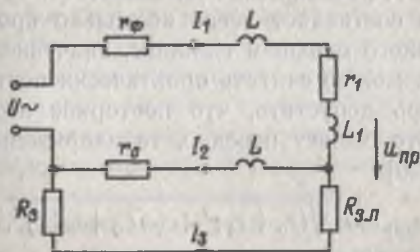


Рис. 11.4 Эквивалентная схема с двумя сосредоточенными заземлителями

$$u_{\text{пр1}} = \frac{(1+A) R_{\text{з.п}} Z_4 + Z_2 (R_{\text{з.п}} + Z_4)}{(1+A) R_{\text{з.п}} (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} U, \quad (11.4)$$

где $A = R_{\text{з}}/R_{\text{з.п}}$.

Если r_1 и L_1 равны нулю, что соответствует случаю соприкосновения с аварийным оборудованием, расположенным непосредственно у повторного заземлителя, то выражение примет вид

$$u_{\text{пр2}} = \frac{Z_2 R_{\text{з.п}}}{(1+A) R_{\text{з.п}} (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} U. \quad (11.5)$$

По мере увеличения A напряжение прикосновения уменьшается. При A , близком к нулю, т. е. при очень малом сопротивлении основного заземлителя, напряжение прикосновения стремится к значению падения напряжения на зануляющей системе. Последнее напряжение, в свою очередь, определяется соотношением между сопротивлениями фазного и зануляющего проводов. Близкое к нулю значение A бывает тогда, когда основным заземлителем является заземлитель питающей подстанции, на которой оборудование напряжением ниже и выше 1000 В оказывается соединенным вместе. Этот заземлитель надежно связан с металлическими оболочками кабельной сети напряжением выше 1000 В.

Площадь соприкосновения с землей металлически связанных между собой элементов, входящих в заземляющее устройство, велика, и сопротивление заземления такого заземлителя очень мало.

На рис. 11.5 приведены кривые $u_{\text{пр}} = f(A)$ для случаев, когда человек касается заземляющей системы как непосредственно у повторного заземлителя, так и на некотором расстоянии от него. Сравнение кривых показывает, что характер их сохраняется, однако значение $u_{\text{пр}}$ больше в случае прикосновения непосредственно у повторного заземлителя. При этом с уменьшением A расхождение уменьшается: при малых значениях A оно составляет всего несколько процентов. При значении A , много меньшем единицы, значение напряжения прикосновения можно считать практически постоянным.

Если теперь допустить, что повторное заземление отсутствует, а это бывает нередко, то напряжение прикосновения будет [20]

$$u_{\text{пр1}} = I \sqrt{(r_0 + r_1)^2 + (\omega L_0 + \omega L_1)^2}, \quad (11.6)$$

где L_0 — индуктивность нулевого провода.

Для некоторых соотношений сопротивлений фазного и нулевого проводов напряжение прикосновения будет находить-

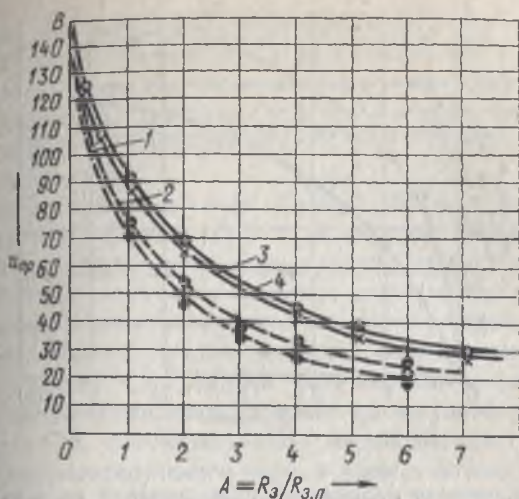


Рис. 11.5. Изменение напряжения прикосновения $u_{пр}$ в зависимости от A — соотношения сопротивлений заземлителей R_z и $R_{z.п}$ при постоянном значении сопротивления заземления повторного заземлителя

1 и 3 — $R_{z.п} = 2$ Ом; 2 и 4 — $R_{z.п} = 0,5$ Ом. Сплошные линии — прикосновение непосредственно у повторного заземлителя; штриховые линии — прикосновение на некотором расстоянии от повторного заземлителя

ся в пределах 130—180 В. Максимальное значение напряжения прикосновения может быть на корпусах, далеко находящихся от общей зануляющей шины трехфазных электроприемников при питании по трехжильному кабелю.

В переходном режиме распределение напряжения прикосновения отлично от распределения напряжения прикосновения в установившемся режиме [42]: больше сказывается расстояние от места, где человек коснулся оборудования, до того оборудования, на котором произошло повреждение.

Расчетные выражения экспериментально проверены на модели и при имитации короткого замыкания в реальных условиях. Для качественной оценки совпадение экспериментальных и расчетных данных достаточно хорошее. Следовательно, эти выражения могут быть рекомендованы для анализа системы зануления и в первую очередь могут быть использованы при расследовании электротравм.

На рис. 11.6 приведены кривые изменения напряжения прикосновения в зависимости от сопротивления заземления повторного заземлителя. Параметры сети постоянны, а сопротивление заземления заземляющего устройства в нейтрали

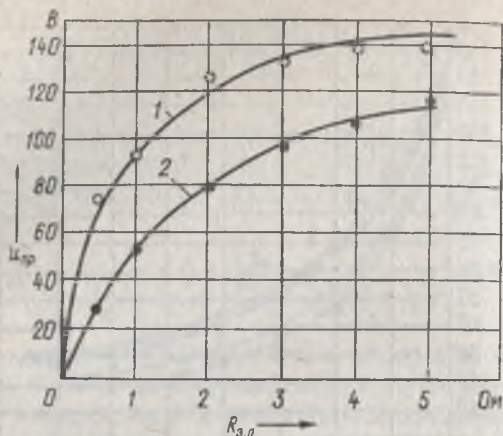


Рис. 11.6. Изменение напряжения прикосновения $u_{пр}$ в зависимости от сопротивления заземления повторного заземлителя $R_{з.п}$ при постоянных параметрах сети
 1 — $R_з = 0,5$ Ом; 2 — $R_з = 2$ Ом

принято равным 0,5 и 2,0 Ом. Подобная же зависимость получена для разных сопротивлений нулевого провода, а именно 0,15; 0,30; 0,45 и 0,60 Ом. Пределы изменения напряжения прикосновения 90—140 В.

Как показали результаты изучения, напряжение прикосновения в сети 380/220 В при одном повторном заземлителе и сделанных ранее допущениях достигает 140—150 В, и это бывает нередко. Встречаются и такие случаи, когда в качестве повторного заземлителя использован водопровод, имеющий сопротивление заземления в пределах 0,004—0,2 Ом.

На рис. 11.7 показана зависимость сопротивления заземления повторного заземлителя от активного сопротивления фазного провода при заданном напряжении прикосновения. Кривые этого рисунка позволяют определить требуемое значение сопротивления заземления повторного заземлителя при заданных значениях напряжения прикосновения у электроприемника.

Напряжение прикосновения в зануляющей системе. В системе зануления, даже имеющей повторные заземлители, между надежно заземленным корпусом или элементом оборудования и землей может возникнуть напряжение, представляющее в определенных условиях несомненную опасность для работающих по значению и по времени его приложения (осо-

бенно при немгновенно действующих отключающих устройствах). В существующих условиях снижать это напряжение можно, либо уменьшая сопротивление нулевого провода, либо изменяя значение A , допуская при этом меньшее напряжение в цеху у электроприемников и большее его значение на питающей подстанции.

При отсутствии нулевого провода (т. е. в системе заземления) или при его обрыве (в системе зануления) напряжение прикосновения определяется только значением A . Практически влиять на значение сопротивления заземления большого числа естественных заземлителей, так или иначе оказавшихся подключенными к искусственным заземлителям, трудно. Приходится устанавливать фактическое значение напряжения прикосновения на зануляющей системе и прибегать к дополнительным мероприятиям, например к устройству изолирующего пола, к изоляции кожуха и т. д.

Рассмотрим зануляющую систему с повторными и естественными заземлителями, когда зануляющий провод имеет, помимо заземлителей на концах, еще и ряд естественных заземлителей. Эквивалентная схема показана на рис. 11.8. Она относится к случаю, когда человек касается заземляющей системы на некотором расстоянии от повторных заземлителей. Схема составлена в общем виде, с сопротивлением в нейтрали трансформатора.

Заземляющая цепь между точками a_2 и b_2 представляет собой однородную симметричную схему с числом n сопро-

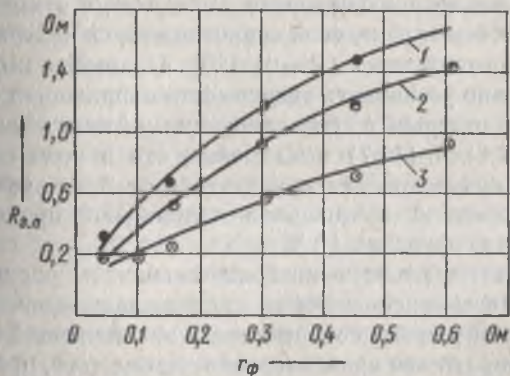


Рис. 11.7. Изменение сопротивления заземления повторного заземлителя $R_{з.п}$ в зависимости от активного сопротивления фазного провода r_{ϕ} при заданных значениях напряжения прикосновения
 $1 - U_{пр} = 36$ В; $2 - 40$ В; $3 - 50$ В

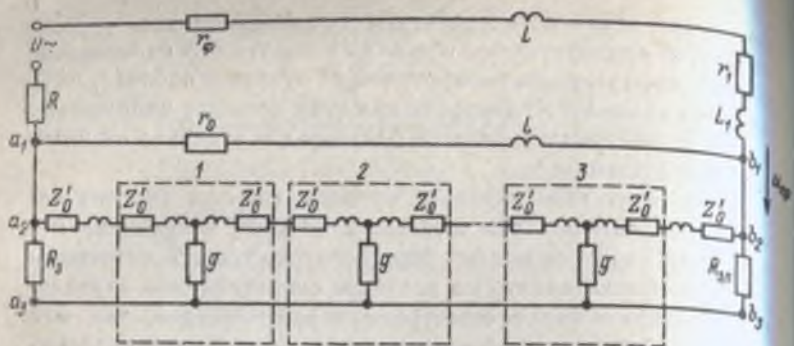


Рис. 11.8. Эквивалентная схема зануляющей системы с распределенными повторными заземлителями

тивлений. Сделано допущение, что все естественные повторные заземлители имеют одинаковую и притом активную проводимость g и расположены на одинаковом друг от друга расстоянии. Напряжение прикосновения, когда человек находится в соприкосновении с зануленным оборудованием непосредственно у повторного заземлителя, определяется выражением

$$\dot{u}_{np} = \dot{U} \frac{Z_2 Z_3}{(Z_2 + Z_4) (Z_1 + Z_3) + Z_2 Z_4}, \quad (11.7)$$

где теперь $Z_4 = R_3 + r_\phi + j\omega L$.

Напряжение прикосновения определится этим же выражением и в том случае, если сопротивление в нейтрали трансформатора отсутствует ($R=0$) [20]. Пользуясь выражением (11.7), можно установить зависимость напряжения прикосновения от отдельных составляющих. Анализ выражений (11.4), (11.6) и (11.7) показывает, что в этом случае напряжение прикосновения практически от A не зависит. Так, при изменении A в три раза напряжение прикосновения изменяется в пределах 10 %.

Результаты расчета позволяют оценить распределение напряжения прикосновения по системе зануления. Оказывается, что чем меньше сопротивление заземляющей цепи, тем меньше напряжение прикосновения. Кроме того, при наличии в сети большого числа заземлителей напряжения могут представлять опасность для человека, так как при некоторых соотношениях сопротивлений фазного и заземляющего проводов они достигают 100 В. Снижение их требует увеличения

сечения нулевого провода, которое для обеспечения безусловно безопасных напряжений иногда превышает сечение фазного. Это вызывает большие осложнения и практически неосуществимо.

Практически к зануляющей (заземляющей) системе преднамеренно или непреднамеренно бывают подключены металлические конструкции зданий, трубопроводы, металлические оболочки кабелей и т. д., являющиеся своеобразными проводниками, шунтирующими нулевой провод. В результате суммарное сечение заземляющего «эквивалентного провода» (если его так можно назвать) иногда значительно превышает сечение фазного. Этим и можно объяснить, что подобная система на практике до сих пор не вызвала особых нареканий. Учесть надежность подсоединения естественных нулевых проводов к заземляющей системе трудно, да и не всегда удобно их использовать, поэтому сказанное выше распространяется и на эту систему.

Напряжение прикосновения в четырехпроводной сети. Своеобразно распределение напряжения прикосновения в четырехпроводных сетях, в которых одновременно имеются четырехжильные и трехжильные кабели. У последних нулевым проводом являются оболочки кабелей. Вот как возникли эти сети.

В связи с ростом коммунально-бытовой нагрузки в Ленинграде и в других городах был осуществлен перевод трехпроводной системы 120 В на четырехпроводную систему 220 В с использованием в качестве нулевого провода свинцовых оболочек кабелей. Этот перевод, собственно говоря, решил проблему городского электроснабжения без крупных затрат, связанных с переоборудованием сетей. Наблюдение за этой системой выявило наряду с положительными результатами и ряд недостатков, которые постепенно устранялись. Ни одного зарегистрированного несчастного случая, вызванного переходом на эту систему, за все время ее существования не было, хотя жалоб на удары током было немало.

В системе 220 В с использованием металлических оболочек кабеля в качестве нулевого провода всегда имеются трехфазные электроприемники (мелкие двигатели коммунальных и торговых предприятий), требующие заземления, которое обычно осуществляется отдельно проложенной стальной шиной. Число таких электроприемников растет. В новых подключаемых установках питание от групповых щитов, а иногда и от трансформаторных подстанций осуществляется не только трехжильным, но и четырехжильным кабелем (четвертая жила — нулевой провод). Поучителен такой случай.

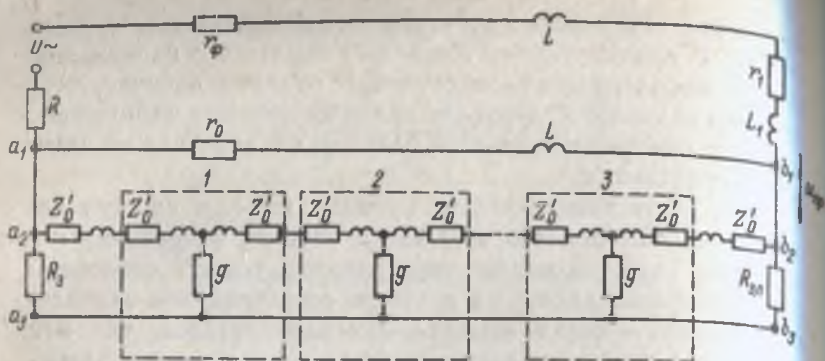


Рис. 11.8. Эквивалентная схема зануляющей системы с распределенными повторными заземлителями

тивлений. Сделано допущение, что все естественные повторные заземлители имеют одинаковую и притом активную проводимость g и расположены на одинаковом друг от друга расстоянии. Напряжение прикосновения, когда человек находится в соприкосновении с зануленным оборудованием непосредственно у повторного заземлителя, определяется выражением

$$\dot{u}_{\text{пр}} = \dot{U} \frac{Z_2 Z_3}{(Z_2 + Z_4)(Z_1 + Z_3) + Z_2 Z_4}, \quad (11.7)$$

где теперь $Z_4 = R_3 + r_\phi + j\omega L$.

Напряжение прикосновения определится этим же выражением и в том случае, если сопротивление в нейтрали трансформатора отсутствует ($R = 0$) [20]. Пользуясь выражением (11.7), можно установить зависимость напряжения прикосновения от отдельных составляющих. Анализ выражений (11.4), (11.6) и (11.7) показывает, что в этом случае напряжение прикосновения практически от A не зависит. Так, при изменении A в три раза напряжение прикосновения изменяется в пределах 10 %.

Результаты расчета позволяют оценить распределение напряжения прикосновения по системе зануления. Оказывается, что чем меньше сопротивление заземляющей цепи, тем меньше напряжение прикосновения. Кроме того, при наличии в сети большого числа заземлителей напряжения могут представлять опасность для человека, так как при некоторых соотношениях сопротивлений фазного и заземляющего проводов они достигают 100 В. Снижение их требует увеличения

сечения нулевого провода, которое для обеспечения безусловно безопасных напряжений иногда превышает сечение фазного. Это вызывает большие осложнения и практически неосуществимо.

Практически к зануляющей (заземляющей) системе преднамеренно или непреднамеренно бывают подключены металлические конструкции зданий, трубопроводы, металлические оболочки кабелей и т. д., являющиеся своеобразными проводами, шунтирующими нулевой провод. В результате суммарное сечение заземляющего «эквивалентного провода» (если его так можно назвать) иногда значительно превышает сечение фазного. Этим и можно объяснить, что подобная система на практике до сих пор не вызвала особых нареканий. Учесть надежность подсоединения естественных нулевых проводов к заземляющей системе трудно, да и не всегда удобно их использовать, поэтому сказанное выше распространяется и на эту систему.

Напряжение прикосновения в четырехпроводной сети. Своеобразно распределение напряжения прикосновения в четырехпроводных сетях, в которых одновременно имеются четырехжильные и трехжильные кабели. У последних нулевым проводом являются оболочки кабелей. Вот как возникли эти сети.

В связи с ростом коммунально-бытовой нагрузки в Ленинграде и в других городах был осуществлен перевод трехпроводной системы 120 В на четырехпроводную систему 220 В с использованием в качестве нулевого провода свинцовых оболочек кабелей. Этот перевод, собственно говоря, решил проблему городского электроснабжения без крупных затрат, связанных с переоборудованием сетей. Наблюдение за этой системой выявило наряду с положительными результатами и ряд недостатков, которые постепенно устранялись. Ни одного зарегистрированного несчастного случая, вызванного переходом на эту систему, за все время ее существования не было, хотя жалоб на удары током было немало.

В системе 220 В с использованием металлических оболочек кабеля в качестве нулевого провода всегда имеются трехфазные электроприемники (мелкие двигатели коммунальных и торговых предприятий), требующие заземления, которое обычно осуществляется отдельно проложенной стальной шиной. Число таких электроприемников растет. В новых подключаемых установках питание от групповых щитов, а иногда и от трансформаторных подстанций осуществляется не только трехжильным, но и четырехжильным кабелем (четвертая жила — нулевой провод). Поучителен такой случай.

ляющая менять напряжение достаточно плавно в пределах 100—2000 В. Сопротивление изоляции измерялось мегомметром напряжением 500 В. Объектами измерения служили противокоррозионные и декоративные покрытия металлических частей самого разнообразного оборудования и приборов, установленных на промышленных предприятиях. Там, где окраска не была повреждена, сопротивление находилось в пределах 10^4 — 10^8 Ом, благодаря чему напряжение оказывалось во много раз ниже опасного значения.

Число повреждений окраски, вследствие которых сопротивление становится равным нулю, соизмеримо с числом повреждений заземляющей проводки. Но для того чтобы установить, произошло ли нарушение или повреждение заземляющей проводки, требуются измерения, тогда как повреждение окраски в доступных для соприкосновения местах легко обнаружить осмотром, да и устранить такое повреждение очень несложно — достаточно покрасить поврежденное место. Защитную изоляцию обеспечивают и обычные противокоррозионные покрытия.

Вероятность нарушения окраски конструкций станков больше вероятности повреждения изоляции кожухов комплектных распределительных устройств, кожухов щитов и т. д. Поэтому и число нарушений окраски на станках сравнительно велико. Однако его можно существенно сократить, если пользоваться не масляными красками, а значительно более стойкими масляно-глифталевыми лаками. Защитную изоляцию необходимо рассматривать как серьезное мероприятие по охране труда, и поэтому к окраске оборудования должны быть предъявлены более жесткие требования.

К числу факторов, снижающих напряжение прикосновения, относится и сопротивление пола перед оборудованием, а также сопротивление обуви. Чтобы проследить за изменением значения напряжения прикосновения под влиянием этих дополнительных сопротивлений, был проведен ряд опытов, воспроизводивших режим однополюсного короткого замыкания в самых разнообразных условиях.

Измерение напряжения производилось: а) между дюралюминиевой пластиной размером 24×30 мм, положенной на пол на расстоянии 0,8 м от оборудования, и корпусом оборудования; б) между корпусом оборудования и естественным заземлителем. Сопротивление прибора находилось в пределах 1800—2500 Ом. Оно примерно соответствует сопротивлению тела человека.

Измерения показали, что напряжение прикосновения

в схеме «корпус оборудования — пластина» в 60 % случаев оказало менее 10 В, даже при увлажнении пола под пластиной, и только в 5 % достигало 1000 В. Соответственно в схеме «корпус оборудования — естественный заземлитель» оно составляло менее 10 В в 36 % случаев и 100 В — в 20 %. Это еще раз подчеркивает значение изоляции поверхности пола для достижения электробезопасности.

Рассмотрим и неблагоприятные факторы. К ним относятся увеличение сопротивления в контакте между корпусом (кавказом) подлежащего защите оборудования и заземляющей шиной (проводом). Сопротивления заземляющих контактов изучены А. А. Капустиным [26]. Измерив сопротивления свыше 10 000 контактов, он показал, что при вводе оборудования в эксплуатацию (измерения проводились на машиностроительных и приборостроительных предприятиях) более 85 % проверенных контактов имели сопротивление менее 0,1 Ом. В процессе эксплуатации число контактов с таким малым сопротивлением несколько уменьшилось, однако после длительной эксплуатации подавляющее число их имело все-таки крайне небольшое сопротивление. Появление в процессе эксплуатации разрывов заземляющей цепи, а число их составляет 2—3 % от числа проверенных контактов, безусловно, настораживает. Именно разрывы заземляющей или зануляющей цепи создают потенциальную опасность поражения.

Отсюда следует, что самым существенным в контроле заземления является проверка сопротивления контактов и проверка надежности изоляционной окраски. Хороший контакт заземляющей шины с оборудованием и окраска всех его частей, подлежащих защите, предопределяют надежность систем заземления и зануления. Численные же значения сопротивления заземления при использовании естественных заземлителей всегда невелики и находятся в пределах требований нормы.

Вообще же надо сказать, что системы заземления и зануления нашли широкое применение в период развития электротехники, когда изоляция не была достаточно надежна. С появлением новых изоляционных материалов, вполне надежных и недорогих, роль заземления и зануления снижается. Главное внимание будет уделяться защитному отключению и профилактическим испытаниям изоляции.

11.6 Защитное отключение

Определение. Защитное отключение является самостоятельным средством защиты человека и животного от напряжения, возникающего на металлических частях оборудования.

ния, нормально не находящихся, но могущих оказаться под напряжением при повреждении изоляции. По своим целям это средство аналогично системам заземления и зануления. Сущность защитного отключения можно сформулировать так. Защитное отключение — это система защиты, основанная на автоматическом отключении электроприемника, если на металлических частях его, нормально не находящихся под напряжением, появляется напряжение, значение которого опасно для человека. Такую систему, предназначенную для сети с изолированной нейтралью, принципиально можно использовать и для сети с заземленной нейтралью.

Впервые подобная защита была предложена О. Лёблем [37] еще в 30-х годах. Однако внедрение ее в практику по ряду технических и организационных причин долгое время затягивалось. Большая заслуга в разработке этой защиты принадлежит Р. М. Лейбову, под руководством которого создан ряд конструкций аппаратов защитного отключения, нашедших практическое использование. Полезный вклад в разработку новой системы защиты внесли И. М. Сирота, Н. И. Орлов, Н. Ф. Шишкин, Г. Ф. Миндели. Их исследования, связанные главным образом с обеспечением условий электробезопасности в шахтных сетях и на передвижных установках, позволили преодолеть ряд технических трудностей, мешавших внедрению системы защитного отключения в практику.

Физическая сущность отключения как средства защиты. Рассмотрим работу защитного отключения. При защите человека от напряжения, возникшего на корпусе одиночного электроприемника вследствие повреждения его изоляции, возможны два случая: электроприемник не заземлен и электроприемник имеет заземление.

Первому случаю соответствует рис. 11.10 — контакт с заземлителем разомкнут. На некотором расстоянии от защищаемого электроприемника забивают в землю какой-либо заземлитель (можно использовать и естественный заземлитель,

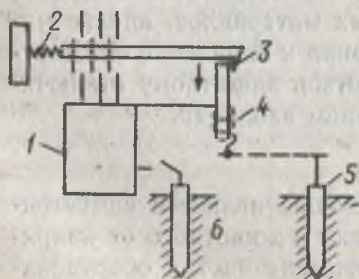


Рис. 11.10. Принципиальная схема защитного отключения
1 — корпус электроприемника; 2 — оттягивающая пружина; 3 — защелка, удерживающая нож отключения; 4 — отключающая катушка; 5 и 6 — заземлители

если есть уверенность, что он не имеет электрической связи с корпусом защищаемого оборудования). Далее ставят сам отключатель, или защитный выключатель. На рис. 11.10 все элементы этого выключателя для наглядности принципа действия разобраны. Защитный выключатель (отключатель) имеет катушку, разрывающую цепь при подаче на нее напряжения. Он может иметь и включающую катушку, позволяющую производить включение нажатием кнопки. Отключающая катушка удерживает выключатель в замкнутом включенном состоянии с помощью защелки. Один конец катушки подсоединен к корпусу электроприемника, второй — к выносному заземлителю. В случае повреждения изоляции, между корпусом электроприемника и выносным заземлителем появится фазное напряжение. Отключающая катушка окажется под напряжением, и через нее пойдет ток. Ее сердечник втянется и освободит удерживающую защелку. Пружина оттянет ножи выключателя, и цепь разорвется. Напряжение прикосновения на корпусе электроприемника пропадет, соприкосновение с ним станет безопасным.

Если корпус электроприемника заземлен, то разъединитель заземлителя будет включен. При повреждении изоляции на корпусе электроприемника появится напряжение, но оно уже не будет равно фазному. Значение возникшего напряжения определит падение напряжения на заземлителе, равное току замыкания на землю, умноженному на сопротивление заземления заземлителя. В этом случае катушка выключателя должна быть рассчитана на действие от меньшего напряжения.

Принципиальной разницы в защите в обоих случаях нет.

Основой защиты с помощью защитного отключения является быстрое отключение поврежденного электроприемника. Чем меньше время действия отключающего устройства, тем надежнее система защиты. Одним из преимуществ защитного отключения является то, что оно может срабатывать и не при полном замыкании, а уже в начале развития повреждения. Это его существенное преимущество. В описываемой системе защиты также используются заземлители, однако устройство их не представляет каких-либо затруднений. Сопротивление отключающей катушки всегда можно подобрать таким, чтобы оно во много раз превышало сопротивление заземления вспомогательного заземлителя. Если же в качестве вспомогательного заземлителя использовать какой-либо естественный заземлитель, то это еще больше упрощает ввод в эксплуатацию защитного отключения.

Защитное отключение, используемое для достижения безопасности, обладает, однако, рядом недостатков. В условиях промышленного предприятия трудно изолировать электроприемники от металлических конструкций зданий, стальной арматуры фундаментов, балок и т. п. Таким образом, надо считаться с тем, что металлические каркасы и кожухи электроприемников в той или иной степени электрически между собой связаны. Как показало исследование сложных заземляющих систем (см. § 11.5), если нейтраль трансформатора — источника питания заземлена, то при повреждении изоляции кожуха электроприемника напряжение может возникнуть даже вдалеке от места повреждения. Значение этого напряжения может колебаться в широких пределах и в сетях 380/220 В превышает 100 В. Если электроприемники оборудованы защитным отключением, возможны ложные отключения неповрежденных электроприемников. Избежать таких ложных отключений крайне сложно, а в большинстве случаев и невозможно. Поэтому область применения защитного отключения в сетях с заземленной нейтралью ограничена. Но сети с изолированной нейтралью, несмотря на растущее внедрение сетей с заземленной нейтралью, несомненно, сохраняются, например в угольных шахтах. Сохранятся сети с изолированной нейтралью также на текстильных и других предприятиях, имеющих пожаро- и взрывоопасные цехи. Здесь, бесспорно, область применения защитного отключения будет устойчивой.

Защитное отключение сложнее в выполнении, чем зануление или заземление. Но развитие приборостроения позволяет создать несложные малогабаритные устройства с применением полупроводников и магнитных усилителей. По нашему мнению, защитное отключение должно найти самое широкое применение в бытовых приборах (стиральные машины, утюги, плиты), в животноводстве (электропоилки, электродойка) и во многих других отраслях народного хозяйства. Создание малогабаритных реле, совмещенных с отключателями, не является проблемой.

УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА ПОДСТАНЦИЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В

12.1. Два подхода к проблеме

В установках напряжением выше 1000 В, работающих в режиме заземленной нейтрали, каждая авария приводит к отключению поврежденного участка в определенное, заданное время. Но одно это еще не обеспечивает безопасности. В современных сетях напряжением выше 110 кВ, где токи замыкания на землю достигают подчас тысяч ампер, на частях установок, нормально не находящихся под напряжением, могут возникать, хотя и кратковременно, высокие и поэтому опасные напряжения прикосновения.

В правилах устройства заземлений, в правилах устройства электротехнических установок, в правилах технической эксплуатации станций, сетей и промышленных установок, а также в других нормативных материалах, изданных в СССР и в некоторых зарубежных странах, наметились два разных подхода к оценке мер безопасности. В одних нормативных материалах указывается, что главным критерием безопасности является недопущение напряжения прикосновения выше определенного значения. При этом к значению сопротивления заземляющего устройства никаких требований, собственно, не предъявляется и оно даже не нормируется. В других же нормативных материалах определяющие требования предъявляются именно к значению сопротивления заземления заземляющего устройства и пусть в общем виде, но все же даются рекомендации в отношении необходимости принятия мер к выравниванию потенциала, т. е. при этом устранение поражающего фактора намечается косвенным путем.

Постепенно в отечественной литературе достаточно четко определилась более-менее общая точка зрения на расчет заземления, сводящаяся к тому, что заземляющее устройство надо рассчитывать как по значению сопротивления заземления, так и по значению напряжений прикосновения и шага. В связи с этим расчет, устройство и эксплуатация заземлений усложнились. В то же время опыт эксплуатации подстанций не подтверждает особой необходимости этих усложнений. Именно поэтому в ПУЭ (1966 г.) нормируются только значения сопротивления заземления заземляющих устройств под-

станций (0,5 Ом для установок выше 1000 В и 4 Ом для установок ниже 1000 В), а напряжения прикосновения и шага не нормируются, хотя необходимость их учета предусматривается.

В ПУЭ указано, что во избежание выноса потенциала электроприемники, находящиеся за пределами установок с большими токами замыкания на землю и входящие в контур заземлителя, запрещено питать от трансформаторов с заземленной нейтралью при напряжении 380/220 или 220/127 В. В случае необходимости эти электроприемники можно питать от трансформаторов с изолированной нейтралью.

Для дальнейшего рассмотрения следует отметить, что значения сопротивления заземления, нормируемые в ныне действующих ПУЭ равными 0,5 Ом (в любое время года), согласно этим же ПУЭ при скалистых грунтах и в районах вечной мерзлоты могут быть повышены. Ссылка на действующие ПУЭ сделана потому, что в них не только отмечена необходимость снижения напряжений прикосновения и шага на открытых подстанциях, но и указано, как это снижение надо осуществлять.

Иначе этот вопрос решен в правилах ГДР, в рекомендациях Института инженеров-электриков США и в нормах Итальянского электротехнического комитета. Эти документы регламентируют значения напряжений прикосновения и шага, но не устанавливают предела для сопротивления заземления. Такое решение оправдывается практической невозможностью снизить сопротивление заземления до значения, при котором общий потенциал заземлителя был бы ниже безопасного уровня.

Между тем известны мероприятия, посредством которых можно на заданной территории ограничить сопротивление заземления определенным значением. Одним из основных исследователей, отстаивающих эту точку зрения в Союзе, является Л. Б. Ослон [54].

Рассмотрим преимущества и недостатки основ нормирования заземления в установках напряжением выше 1000 В.

Для этих объектов, обслуживаемых квалифицированным персоналом, который к тому же проводит на подстанциях сравнительно мало времени и выполняет там лишь небольшой объем ремонтных и эксплуатационных операций с обязательным применением дополнительных средств защиты, значение расчетных безопасных напряжений можно условно принять значительно выше, чем для промышленных предприятий и коммунально-бытовых установок.

Расчет безопасного напряжения по значению сопротивления заземления исключает пользование такими неопределенными понятиями, как безопасное напряжение, что, к слову сказать, облегчает контроль защитного мероприятия. Но надо подчеркнуть, что это только формально, поскольку на необходимость выравнивания потенциала в ПУЭ все же указано и даже даны конкретные рекомендации относительно расположения выравнивающих стальных полос. Однако не сказано, как эти требования должны согласовываться между собой. Действующие ПУЭ при высоких значениях удельных сопротивлений грунтов разрешают сопротивление заземления подстанций увеличивать в 10 раз. Это обосновывается тем, что при грунте с высоким удельным сопротивлением в расчетную схему прохождения тока через тело человека должно быть добавлено большое значение последовательно включенного переходного сопротивления между ногой человека и поверхностью земли.

По хорошо аргументированному мнению Л. Б. Ослона, во многих случаях проектирование заземлений применительно к таким требованиям существенно увеличивает их стоимость, особенно в скальных грунтах и в грунтах с большим значением удельного сопротивления. Но еще важнее, пожалуй, то, что даже значительные затраты труда и средств оказываются недостаточно эффективными.

Все эти возражения настолько серьезны, что целесообразно рассмотреть всю систему нормирования заземления. Это тем более необходимо, что в ряде стран нормирование по напряжениям прикосновения и шага начало широко распространяться. Известную роль в этом сыграл доклад, опубликованный в сборнике [90]. В нем приведены рекомендации по переходу к расчету заземлений по напряжениям прикосновения и шага, численные значения которых даны на основе исследований, проведенных Ц. Дальзиелем. В приложенных к докладу материалах дискуссии показано на примерах, как рассчитать различные заземляющие устройства по напряжениям прикосновения и шага и как обеспечить выполнение требований к заземлению, чтобы полученные численные значения не превысили нормативных. В тех же материалах рекомендуется в качестве основного технического решения применять выравнивающие сетки, располагая их на сравнительно небольшой глубине от поверхности почвы, т. е. основной упор делается на регулирование распределения потенциала.

Переход к таким заземляющим устройствам наметился также в ГДР, в Испании, во Франции и в некоторых

других странах. Требование обеспечения определенных численных значений сопротивлений заземлений не учитывается.

В зарубежных работах численные значения нормируемых напряжений прикосновения и шага устанавливаются по результатам исследований Ц. Дальзиеля, Х. Швана [111], Г. Болла и других в пределах 50—200 В. Наиболее распространенными нормативными значениями, как и в прежние годы, являются 125—150 В.

Интересные с этой точки зрения работы по исследованию заземлителей выполнены в Болгарии. Там сделана попытка примирить оба направления в расчете заземления. Болгарские исследователи считают возможным увеличить сопротивление заземления сверх 0,5 Ом при условии выравнивания потенциалов.

Того же мнения придерживается и ряд советских специалистов, в том числе Л. Б. Ослон. Их позицию можно сформулировать так: поскольку повсеместный переход на систему электроснабжения с заземленной нейтралью, принятый в условиях широкого распространения напряжения 110 кВ, усложняет требования к выполнению заземления, было бы целесообразнее обеспечить безопасные условия работы эксплуатационного персонала посредством применения заземлителей, обладающих определенной проводимостью, и выравнивающей сетки надлежащей густоты.

Чем же объясняется подобная разница во взглядах? Тем ли, что авторы соответствующих разделов Правил игнорируют довольно широко представленное в литературе мнение, или же тем, что сторонники перехода на новую систему расчета, в свою очередь, игнорируют накопленный опыт и переоценивают возможности достижения безопасности при нормировании по напряжениям прикосновения и шага?

Следует подчеркнуть, что значение выравнивания потенциалов на территории подстанций не оспаривается, о чем свидетельствуют ПУЭ. Выравнивание потенциалов на территории, занимаемой электроустановками с большими токами замыкания, принципиально предусмотрено в ПУЭ так же четко, как в аналогичных нормативных документах США и других стран. Исключением является лишь одно принципиальное положение: в ПУЭ не нормируются напряжения прикосновения и шага. Это объясняется в известной степени тем, что в исходных представлениях о механизме электротравмы существуют принципиальные разногласия и далеко не все согласны с точкой зрения специалистов из США, данные которых рекомендуются для нормирования.

При расчетах в качестве напряжений прикосновения и шага можно принять напряжение 150 В. Это не противоречит точке зрения о возможности поражения напряжением ниже 150 В. Напряжение 150 В не является само по себе безопасным. Его можно назвать расчетным напряжением при проектировании заземления на высоковольтных подстанциях. Подстанции обслуживаются лицами электропрофессий. Обслуживание их требует использования средств личной защиты — изолирующих перчаток, галош, изолирующих площадок и других мер безопасности; безусловно, присутствует оградительный эффект — фактор внимания. Поэтому значение 150 В может быть вполне рекомендовано для расчета заземлений в установках напряжением выше 1000 В, как это обстоятельно показано в девятой главе.

Расчет заземлений с учетом напряжений прикосновения и шага полезен еще и потому, что позволяет выявить наиболее опасные места. Использование современной вычислительной техники дает возможность получать без большой затраты времени расчетные данные по типовому программированию даже для неоднородных грунтов.

Выполнение заземлений подстанций напряжением 110 кВ и выше, работающих в сетях с заземленной нейтралью, связано с наибольшими сложностями. Поэтому ниже рассматриваются основные положения, касающиеся проектирования именно этих заземляющих устройств.

12.2. Комплекс работ при сооружении заземляющего устройства подстанции

Комплекс работ, которые необходимо выполнить при сооружении заземляющих устройств подстанций, дается ниже в той технологической последовательности, в которой они должны проводиться.

1. Исследование характеристик грунта и выбор расчетного значения его удельного сопротивления.
2. Определение максимального и расчетного токов короткого замыкания.
3. Предварительное определение (с учетом реального плана подстанции) числа и взаимного расположения заземляющих магистралей, укладываемых исходя из требований заземления всего оборудования и всех конструкций.
4. Определение суммарной проводимости, которой могут обладать все основания сооружений подстанций: фундаменты, сваи, подножки, металлические конструкции и т. д.
5. Определение сопротивления заземления системы «трос — опоры».
6. Предварительное определение суммарной проводимости по пп. 3—5.
7. Ориентировочное определение значения потенциала на

заземляющем устройстве. 8. Определение напряжения прикосновения: а) на территории подстанции — внутри сетки; б) вне подстанции — снаружи сетки. 9. Определение напряжения шага: а) на территории подстанции — внутри сетки; б) вне подстанции — снаружи сетки. 10. Оценка значений напряжений прикосновения и шага в особо опасных точках. 11. Оценка результатов первоначальных расчетов и выяснение необходимости увеличения проводимости ранее намеченных заземляющих устройств. 12. Увеличение (в случае необходимости) проводимости заземляющих устройств посредством размещения дополнительных вертикальных глубинных заземляющих электродов с одновременным увеличением поверхности выравнивающей сетки в опасных местах. 13. Повторное определение суммарной проводимости заземляющего контура с учетом дополнительных мероприятий по п. 12, оценка ее значения и решение о необходимости дополнительного увеличения проводимости путем применения выносных контуров, искусственной обработки грунта или других мероприятий. 14. Оценка значения выносных потенциалов. 15. Конструктивная разработка заземляющих устройств и дополнительное размещение заземлителей в местах установки разрядников, молниеотводов, силовых трансформаторов, могущих работать с заземленной нейтралью. 16. Испытание заземляющих устройств. 17. Оформление отчетно-технической документации.

Приведенная схема сооружения заземляющих устройств относится к открытым подстанциям, работающим в системах с заземленной нейтралью. Для закрытых подстанций в эту схему следует внести некоторые изменения и дополнения. В основном они касаются специфических особенностей учета выравнивания потенциалов.

Наличие бетонных полов и различных изолирующих покрытий, с одной стороны, требует учета переходного сопротивления между ногой и бетонным полом, что значительно изменяет сопротивление пути протекания тока. С другой стороны, изменяется и картина распределения потенциала.

12.3. Исходные данные для проектирования заземляющих устройств

Исследование грунта. Лицам, обеспечивающим электробезопасность, нередко приходится учитывать прохождение тока в земле. Это требует от них знания многих характеристик грунта, и прежде всего, конечно, его электропроводности — свойства, обусловленного химическим и гранулометри-

ческим составом грунта, его влагоемкостью и влагопроницаемостью.

Для рационального проектирования заземляющих устройств подстанций необходимо всестороннее определение электрофизических характеристик грунтов, залегающих на территории подстанции (удельное сопротивление, гидродинамические свойства и т. д.). Необходимо также выяснить, имеется ли подсос влаги фундаментами, ибо только при наличии такого режима основания будут влажными и потому проводящими. Удельное сопротивление почвы резко возрастает, если содержание влаги в ней падает ниже 20 %. В большинстве случаев содержание влаги в почве увеличивается по мере углубления. Поэтому заземляющие электроды, используемые с целью достижения максимальной проводимости, надо укладывать возможно глубже. В настоящее время применяют вертикальные, глубоко погружаемые заземлители, длина которых достигает 5—10 м, а в отдельных случаях и больше. Производство работ по погружению в землю таких заземлителей [33, 34] освоено и механизировано. Наиболее полные данные о содержании влаги в грунтах по глубине, т. е. по слоям, могут быть получены методом электроразведки.

Рекомендации относительно расчетного тока. В соответствии с намечаемыми в настоящее время изменениями ПУЭ за расчетный ток при проектировании заземляющих устройств подстанций принимается наибольший ток (действующее значение периодической составляющей за первый период), стекающий с заземления в землю при возникновении короткого замыкания на подстанции или вне ее. Типичные случаи такого рода представлены на рис. 12.1.

1. Замыкание произошло на рассматриваемой подстанции, нейтрали трансформаторов заземлены только на ней (рис. 12.1, а). Ток замыкания протекает в нейтраль трансформатора главным образом по заземляющему устройству подстанции, с которым нейтраль соединена металлически, и лишь незначительная его часть стекает в землю.

2. Замыкание произошло на рассматриваемой подстанции, а нейтрали трансформаторов заземлены на подстанции, находящейся на другом конце линии электропередачи (рис. 12.1, б). На линии электропередачи, на всем ее протяжении, подвешены заземляющие тросы. В этом случае весь ток короткого замыкания, за исключением его части, протекающей по заземляющим тросам или, точнее, по системе «трос — опоры», протекает через заземляющее устройство и является расчетным.

3. Замыкание произошло на рассматриваемой подстанции, причем нейтрали трансформаторов заземлены не только на ней, но и на других подстанциях. На линии электропередачи, на всем ее протяжении, подвешены заземляющие тросы. На рассматриваемой подстанции составляющая тока короткого замыкания, которая протекает в нейтрали установленных на ней трансформаторов, не стекает в землю, а проходит по заземляющему устройству непосредственно в нейтрали. Что же касается той составляющей тока короткого замыкания, которая течет в заземленные нейтрали трансформаторов, установленных на других подстанциях, то она протекает в землю через заземляющее устройство рассматриваемой подстанции, но не полностью, а за вычетом доли тока короткого замыкания, которая через заземляющее устройство стекает в землю, и является расчетной для его проектирования.

4. Замыкание произошло на линии передачи, за пределами подстанции (рис. 12.2). Здесь, так же как и в предыдущих случаях, предполагается, что по всей длине линии электропередачи подвешены заземляющие тросы, а нейтрали трансформаторов заземлены на обеих подстанциях. При проектировании заземляющих устройств рассматриваемой подстанции расчетной будет та часть суммарного тока короткого замыкания, которая через эти заземляющие устройства и нейтраль трансформаторов протекает в землю, т. е. здесь также не должна учитываться доля тока короткого замыкания, попадающая в эти же нейтрали по заземляющим тросам.

Таким образом, значение полного тока однофазного короткого замыкания в месте аварии не является расчетным для проектирования заземляющих устройств. Расчеты следует вести, только исходя из той части тока короткого замыкания, которая стекает в землю через проектируемое заземление.

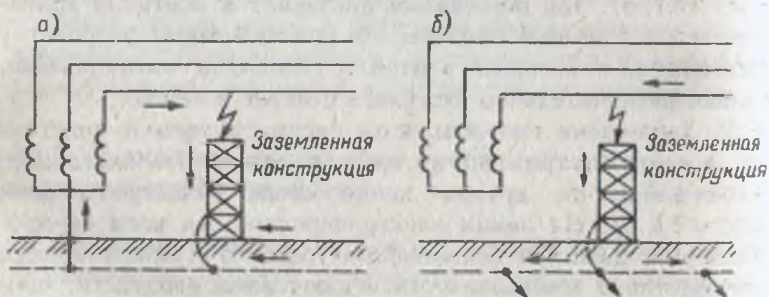


Рис. 12.1. Схема протекания тока при повреждении изоляции на территории подстанции

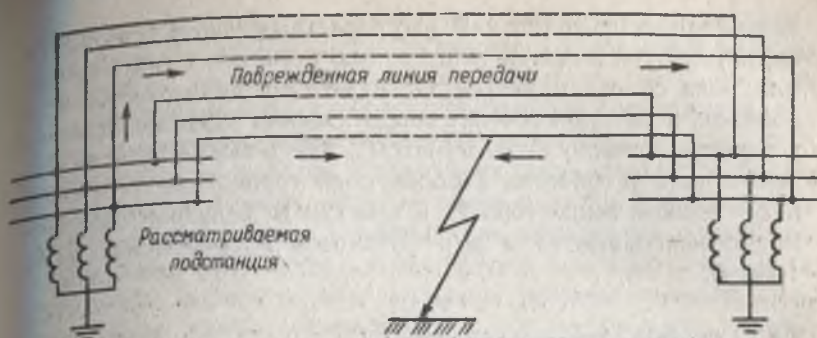


Рис. 12.2. Схема протекания тока при повреждении изоляции вне территории подстанции

В настоящее время при проектировании систем и сетей, в том числе и подстанций, расчеты токов короткого замыкания производятся на вычислительных машинах. Они выполняются с большой полнотой, и составляющие суммарного тока короткого замыкания в месте аварии достаточно подробно дифференцируются. Поэтому для расчетов заземляющих устройств всегда могут быть отобраны обоснованные исходные данные. Однако здесь имеется некоторая специфика. Обычно значение тока однофазного короткого замыкания вычисляется без учета активного сопротивления системы, активного сопротивления в месте замыкания и сопротивления заземления подстанции, так как эти сопротивления складываются с реактивными сопротивлениями системы векториально и по своим значениям не могут сколько-нибудь значительно изменить общее сопротивление. Но когда сопротивление заземления велико (подстанция расположена на грунтах с плохой проводимостью, нормированное значение сопротивления заземления подстанции равно 5 Ом) или когда подстанция находится вблизи шин генераторного напряжения мощной электростанции, такое допущение может привести к тому, что при расчетах заземлений надо будет исходить из неоправданно утяжеленных условий. В подобных случаях при определении токов короткого замыкания заземления подстанции следует учитывать значение активного сопротивления, а следовательно, и снижать значения расчетного тока.

Особенности заземления подстанций, работающих в сетях с изолированной нейтралью. Проектирование заземляющих устройств, работающих в сетях с изолированной нейтралью, отличается от проектирования заземлений в сетях, имеющих

заземленную нейтраль, тем, что расчетным током I_p является емкостный ток замыкания на землю с учетом его компенсации, если она применяется. Отличаются и нормативные требования, а именно значение сопротивления заземления таких установок должно быть $R_z = U/I_p$, где $U = 250$ В, если заземляющие устройства используются только для установок напряжением выше 1000 В, и $U = 120$ В, если они одновременно используются и для установок напряжением ниже 1000 В.

12.4. Основы проектирования заземляющих устройств подстанций

Основы расчета и проектирования заземлителей были даны в начале 30-х годов сначала П. Рюденбергом, а затем Ф. Оллендорфом [41]. Они касались главным образом способов расчетов одиночных заземлителей, отличавшихся друг от друга формой, протяженностью и глубиной залегания. Сопротивление заземления групповых заземлителей, составленных из труб и полос различного взаимоположения, определялось по тем же формулам, причем для учета экранирования широко использовались данные ВЭИ. Уже тогда знали, что на заданной площади можно эффективно расположить лишь ограниченное число заземлителей, ибо увеличение их числа сверх известного предела приводит к столь большому взаимному экранированию их, что практически увеличения проводимости не достигается и технико-экономические показатели получаются низкими. В этот период все расчеты выполнялись в предположении однородной структуры грунта.

Уже в 50-х годах и в Советском Союзе, и за рубежом стали уделять большое внимание сложным заземляющим устройствам — сеткам. Основополагающими в этой области следует считать работы П. Лорана (Франция), В. Коха (ФРГ) и Л. Б. Ослона (СССР) [54]. Последний создал методику расчета сложных заземлителей, которая в настоящее время имеет все основания рассматриваться как классическая. Но эта методика базировалась опять-таки на предположении об однородной структуре грунта. На необходимость учета многослойности грунта при расчете заземлителей в середине 50-х годов указывал В. В. Бургсдорф. Позже А. И. Якобс предложил обобщенную методику расчета сложных заземлителей, учитывающую многослойную структуру грунта.

Выравнивающие сетки. Под выравнивающей сеткой понимают перекрещивающиеся под поверхностью грунта и соеди-

ненные между собой металлические голые провода или шины. Основное назначение сетки заключается в создании на всей территории подстанции и непосредственно около нее, по внешнему периметру, такого распределения потенциалов, которое обеспечило бы необходимую степень безопасности. Распределение потенциалов у одиночных заземлителей, особенно в их начальной части, носит не очень плавный характер. Его можно сделать более равномерным, «подперев» потенциал в отдельных точках, что и достигается с помощью сеток. Того же можно добиться, но с меньшим успехом, изменив конфигурацию самого заземлителя и его заглубление, а при применении групповых заземляющих электродов — путем их рационального расположения. Эти возможности, которыми в недалеком прошлом незаслуженно пренебрегали, позволяют облегчить обеспечение безопасности на территории подстанции. Это станет очевидным, если учесть значительные токи коротких замыканий, которые возникают при авариях и, протекая через заземления подстанций, создают на них падение напряжения, достигающее в некоторых случаях даже до нескольких киловольт. В сетях напряжением 110 кВ и выше, работающих с заземленной нейтралью, эти токи достигают десятков тысяч ампер.

Необходимо отметить и даже особо подчеркнуть, что в СССР еще в 30-х годах придерживались мнения о необходимости учета и нормирования напряжений прикосновения и шага.

Требование заземлять все металлические части оборудования предопределило прокладку заземляющих магистралей вдоль его рядов. Эти магистрали, расположение которых задается планом подстанции, и составляют основу выравнивающих сеток. Обычно оборудование располагают на стороне высокого напряжения по следующим рядам: линейные разъединители, линейные выключатели, шинные разъединители отходящих линий, шинные разъединители трансформаторов, выключатели трансформаторов; примерно таково же расположение оборудования и на стороне напряжения ниже 1000 В. Вдоль фронта оборудования, на каждой линии его установки, прокладывают систему параллельных полос (шин), служащих для подключения заземляющей проводки, идущей к заземляемому оборудованию. В то же время эти полосы (шины) обеспечивают выравнивание потенциала на территории подстанции; если их недостаточно для выравнивания, прокладывают дополнительные. Если и после этого суммарное значение проводимости заземляющего устройства подстанции оказывается недостаточным, то необходимое ее

значение получают другим путем. Такой подход к проектированию заземляющих устройств наиболее рационален.

Учитывая основное назначение этих заземляющих полос, их следует укладывать не ближе чем на расстоянии 0,8—1 м от оборудования и от стен; тогда человек сможет коснуться этого оборудования, находясь только за полосой, а не перед ней.

Чтобы максимально уменьшить напряжение прикосновения, выравнивающую сетку располагают как можно ближе к поверхности земли. Для получения же наименьших значений шаговых напряжений сетку надо заглублять. Поэтому там, где решается задача обеспечения необходимых значений напряжения прикосновения, сетку надо располагать возможно ближе к поверхности земли; но там, где этого требования нет, территория же подстанции тесна, сетку следует заглубить. Такие решения рациональны; однако на практике для упрощения работ в большинстве случаев прибегают к «унификации» и всю сетку, на всей территории, укладывают на одной глубине, обычно на расстоянии 0,5—0,8 м от поверхности грунта.

Перейдем к расчету напряжения прикосновения и сопротивления заземления сеток. П. Лоран считает, что для применяемых на практике размеров заземляющих проводов, расстояний между ними и глубин укладки справедливы упрощенные приближенные соотношения:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{шаг}} &= 0,1 + 0,15\rho i; \\ u_{\text{пр}} &= 0,6 + 0,8\rho i; \\ u_{\text{ячейки сетки}} &= \rho i. \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

В этих уравнениях под величиной $u_{\text{ячейки сетки}}$ понимают напряжение по отношению к центру прямоугольной ячейки, образованной заземлителями, а не по отношению к точке, удаленной, как это часто принимается, на 1 м. Необходимость введения в расчет величины $u_{\text{ячейки сетки}}$ мотивируется тем, что человек может коснуться заземленного предмета, находясь на расстоянии больше чем 1 м от него, в силу чего он попадает под большую разность потенциалов. В этих уравнениях приняты следующие обозначения: $u_{\text{шаг}}$ — шаговое напряжение на расстоянии 1 м по горизонтали, В; $u_{\text{пр}}$ — напряжение прикосновения на расстоянии 1 м от проводника сетки, В; $u_{\text{ячейки сетки}}$ — разность потенциалов между проводниками сетки и поверхностью земли в центре ячейки сетки, образованной этими проводниками, В; ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м; i — ток, стекающий в землю, на 1 м проводника, заложенного в землю, А.

Значение

$$i = I_{к.р}/L, \quad (12.2)$$

где $I_{к.р}$ — расчетный ток короткого замыкания, А; L — общая длина проводников, образующих сетку, включая суммарную длину вертикальных электродов, если они применены, м.

Формулы, предложенные П. Лораном, являются приближенными. Для более точных расчетов рекомендуется либо воспользоваться поправочными коэффициентами, определенными В. Кохом и другими авторами, либо промоделировать заземляющую систему.

Первоначальное уравнение для $u_{\text{ячейки сетки}}$ можно переписать в виде

$$u_{\text{ячейки сетки}} = k_i k_m \rho \frac{I_{к.р}}{L}, \quad (12.3)$$

где k_i — коэффициент, учитывающий стекание тока в землю; k_m — коэффициент, учитывающий влияние числа полос в сетке, расстояния между ними D , диаметра d и глубины залегания t заземлителей сетки:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16td} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \dots \right). \quad (12.4)$$

Число множителей, заключенных в скобки во втором члене правой части этого уравнения, равняется числу параллельных полупроводников в основной сетке (не считая поперечных связей) минус два. Под величиной ρ для практических расчетов следует принимать среднее значение удельного сопротивления грунта в ом-метрах.

В результате обработки опытных данных, полученных В. Кохом, с помощью методики, предложенной П. Лораном, в работах по заземлениям [54] определены суммарные значения произведения коэффициентов $k_i k_m$. Умножив на них значение $\rho I_{к.р}/L$, можно получить действительное значение потенциала ячейки сетки в вольтах. Значения $k_i k_m$ для сеток пяти типов приведены на рис. 12.3. Ценность этого рисунка состоит в том, что приведенные на нем значения $k_i k_m$ позволяют оценить распределение потенциала по территории подстанции и установить, нужно ли усиливать сетку. В табл. 12.1 даны значения расчетных коэффициентов для указанных на рисунке типов сеток.

Аналитическое выражение для коэффициента прикосновения может быть написано в виде

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{k_i k_m \rho}{RL}, \quad (12.5)$$

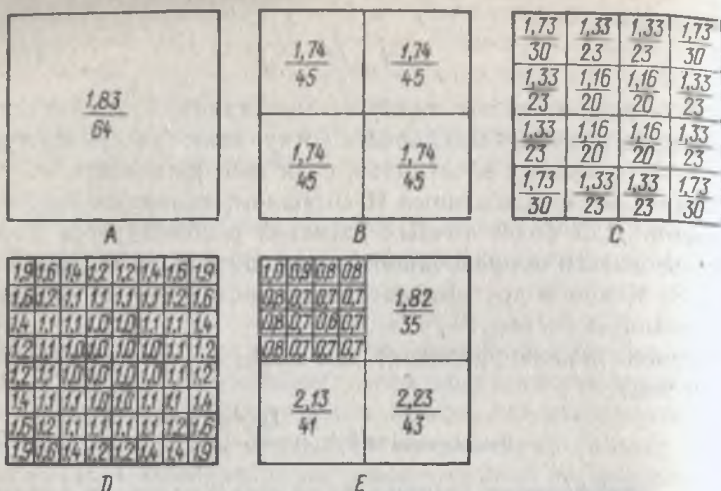


Рис. 12.3. Примеры различных типов выравнивающих сеток k, k_m . Цифры в числителях — произведение коэффициентов, в знаменателях — напряжение по отношению к земле внутри контура в процентах от полного напряжения заземления заземлителя относительно земли

где все обозначения объяснены ранее, а величина k_m определяется по уравнению (12.4).

Многие авторы [47, 54], разрабатывая методику расчета сетки в отношении распределения на ней потенциалов, предложили и расчетные формулы для определения сопротивления заземления сетки в целом. Так, для определения сопротивления заземления сетки П. Лораном предложено широко принятое в настоящее время выражение

$$R = \rho / (4r) + \rho / L, \quad (12.6)$$

где r — радиус круглой пластины, площадь которой равна площади S , занимаемой сеткой, м (рис. 12.4); $r = \sqrt{S/\pi}$; L — суммарная длина проводников сетки, м; ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м.

Второй член добавлен в правую часть этой формулы для учета разницы в сопротивлениях заземления сплошной пластины и заземляющей ее сетки. Чем гуще сетка, тем со-

Таблица 12.1. Расчетные максимальные значения коэффициентов

Коэффициент	Тип сетки				
	A	B	C	D	E
k_i	1,83	1,50	1,18	0,86	1,50
k_m	1,0	1,16	1,47	2,21	1,49
$k_i k_m$	1,83	1,74	1,73	1,90	2,23

противление заземления сетки ближе к той же величине у сплошной пластины. Формула справедлива для случаев, когда глубина залегания сетки l мала по сравнению с ее размерами, т. е. когда выдержано условие $l \ll r$. Эта формула дает достаточно хорошие результаты, особенно в случаях, когда отношение сторон квадрата или прямоугольника сетки невелико.

В общем виде, по Л. Б. Ослону [54], сопротивление заземления сетки следует определять по выражению

$$R = k\rho/\sqrt{S}, \quad (12.7)$$

в котором член k находится в пределах 0,5—0,7, причем низший предел относится к густой сетке, а верхний — к сеткам, не имеющим поперечных связей. В. Кох в уравнении (12.7) рекомендует принимать значение $k=0,55$. Л. Б. Ослон предложил уточнить расчет сеток, используя метод наведенных потенциалов. Для этого необходимо расчеты сопротивления контуров сеток вести по формуле

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{td_w} + \ln \gamma \right), \quad (12.8)$$

где d_w — диаметр проводника сетки; γ — коэффициент конфигурации сетки.

На рис. 12.5 указаны значения отношения сопротивления заземления сетки R к k в зависимости от корня квадратного из площади S , занимаемой сеткой. Из кривых видно, что эта зависимость близка к обратной пропорциональности. Это объясняется тем, что в пределе, при бесконечном увеличении густоты сетки, получаются условия, соответствующие сплошной пластине. Для круглой пластины, лежащей на поверхности земли, Ф. Оллендорфом дано выражение

$$R = \rho/(4r). \quad (12.9)$$

Если принять, что $r = \sqrt{S/\pi}$, и подставить это значение в формулу для R , то она получит вид

$$R = 0,443\rho/\sqrt{S}. \quad (12.10)$$

Формулу (12.10) можно применить и к прямоугольным пластинам при условии $l \ll \sqrt{S}$, что на практике

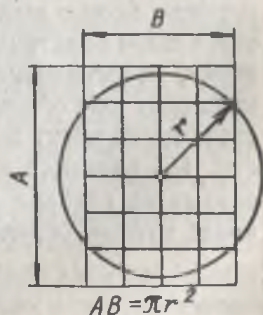


Рис. 12.4. Модель поверхности сетки
 r — радиус эквивалентной окружности

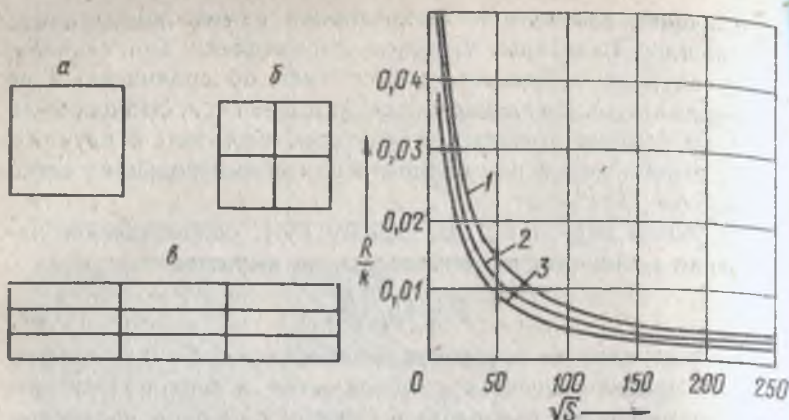


Рис. 12.5. Зависимость сопротивления заземления от площади S , занимаемой заземлителями

1 — для заземлителя а; 2 — для заземлителя б; 3 — для заземлителя в

обычно имеет место. Однако выражение (12.7) в большей степени отвечает практике расчетов, так как позволяет сделать вывод о возможности в благоприятном случае с помощью сетки достичь значения сопротивления заземления, равного 0,5 Ом при условии $\sqrt{S} = \rho$. Для квадратной сетки это условие превращается в $l = \rho$. При средних значениях удельного сопротивления $\rho = 10^2$ Ом·м сторона квадрата сетки l должна быть не менее 100 м, чтобы получить сопротивление заземления, равное 0,5 Ом. Дополнительная укладка полос тогда не нужна.

Если проектировщик нужным образом распределит потенциалы по защищаемой территории и одновременно правильно учтет проводимость грунта, то это даст оптимальное решение устройства заземления.

Расчет напряжения шага. Выравнивая потенциалы на территории подстанции путем применения сеток различной густоты, можно добиться снижения напряжений прикосновения и шага практически в любой заданной цепи. Но на территории, примыкающей к площади, занимаемой сеткой, существуют уже совсем другие условия, которые не всегда и не столь легко могут быть изменены для достижения безопасности. На значение шагового напряжения большое влияние оказывает глубина заложения заземлителя. Поэтому будет более точным определение $u_{\text{шаг}}$ по выражению

$$u_{\text{шаг}} = k_s k_i \rho \frac{I_{\text{к.п.}}}{L}. \quad (12.11)$$

В этом уравнении k_s — коэффициент, учитывающий влияние числа проводников сетки, их диаметра d , расстояния между ними a , а также глубины их укладки t . Численное значение этого коэффициента определяется по уравнению

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2t} + \frac{1}{a+t} + \frac{2}{d} + \frac{1}{3d} \dots \right). \quad (12.12)$$

Общее число членов внутри скобок принимается равным числу параллельных заземлителей в сетке, не считая поперечных связей. Значение k_s определяется в предположении, что проводники сетки укладываются на расстоянии друг от друга, равном a . Ни отклонения от этого предположения, возможные в действительности, ни влияние поперечных проводников не требуют внесения значительных уточнений, поскольку параметр $u_{\text{шаг}}$ сам по себе по многим причинам более безопасен, чем $u_{\text{пр}}$. Вообще же следует иметь в виду, что наивысшие значения шаговых напряжений будут наблюдаться вблизи углов и на углах сетки, так как в этих местах происходит наибольшее стекание тока в землю. Так, П. Лоран считает, что на углах сетки шаговое напряжение может быть в 1,5—2 раза больше, чем вблизи средней части сетки. Здесь значение 1,5 относится к густым сеткам, а 2 — к более редким сеткам. Для определения напряжения шага П. Лоран предлагает принимать значение $k_s k_i$ равным 0,1—0,2. По данным К. Волковинского [114], Яновский и Пиасек это же произведение оценивают в 0,19—0,34. Эти значения приводятся для того, чтобы проиллюстрировать, насколько практически близкими получаются значения $u_{\text{шаг}}$, определяемые по различным источникам.

Аналитическое выражение для определения коэффициента шага можно записать в виде

$$\alpha_{\text{шаг}} = \frac{k_s k_i \rho}{RL}, \quad (12.13)$$

где все обозначения объяснены ранее. Значение k_s в данном случае определяется по уравнению (12.12).

Уменьшение напряжения шага вне контура. В тех случаях, когда внутри контура достигнуто выравнивание потенциалов, а шаговые напряжения вне контура, на участках, прилегающих к нему, велики, необходимы дополнительные меры. Такие меры в первую очередь приходится принимать на углах контура и в местах входа на подстанцию, где наблюдается наиболее интенсивное передвижение людей. Иногда может встретиться необходимость дополнительного выравнивания

потенциалов по всему периметру подстанции за пределами ее территории. Эта последняя мера во многом определяется тем, из какого материала сооружен забор подстанции и на каком расстоянии он находится от заземляющего контура.

Основным способом уменьшения шагового напряжения при всех прочих неизменных условиях является заложение проводников и параллельная их укладка друг около друга, но на разных глубинах. Для выравнивания потенциалов в отдельных местах эффективна также укладка козырьков за пределами основного заземляющего контура.

Чтобы улучшить распределение потенциалов по углам контура, рекомендуется либо создать там дополнительную проводимость путем забивки какого-то числа труб, либо, что еще проще, округлить углы контура, т. е. сделать его овальным.

Вынос потенциала. Потенциал может быть вынесен по трубам водопроводных магистралей, по протекающей в них воде, по рельсам, по оболочкам кабелей, а при сочетании ряда неблагоприятных условий — и по проводам связи. Конструктивная часть заземляющих устройств должна быть запроектирована с учетом этого обстоятельства, причем в ПУЭ имеются на этот счет прямые указания, предписывающие, например, не заземлять рельсы. Правильность таких решений не всегда бесспорна. Количественную оценку выноса потенциала по водопроводным трубам можно найти либо по данным измерений, проведенных при выполнении заземления, либо путем моделирования.

12.5. Учет неоднородности грунта при расчетах простых и сложных заземлителей

Еще в 1954 г. В. В. Бургсдорф опубликовал методику расчета заземлений в неоднородных грунтах, содержащую универсальные графики и таблицы и ставшую основополагающей. В этой методике, разработанной применительно к двухслойному грунту (что для большинства случаев является допустимым приближением), вводится понятие действующего эквивалентного удельного сопротивления грунта ρ_d , а также коэффициента неравномерности $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_1 + \rho_2)$. Таким удельным сопротивлением будет обладать однородный грунт, а сопротивление заземления заземлителя заданных размеров, помещенного в этот грунт, будет равно сопротивлению заземления такого же заземлителя в реально неоднородном грунте. Эта методика, отличающаяся достаточной строгостью и большой точностью, весьма удобна для практического

применения, так как позволяет благодаря введению в расчет эквивалентного удельного сопротивления грунта использовать в качестве универсальных формулы, первоначально предназначенные лишь для определения сопротивления заземления одиночных заземлителей, помещенных в однородный грунт.

Наибольший практический интерес представляют два заземлителя — вертикальный заземлитель и полоса.

Рассмотрим сравнительно простой случай, когда грунт состоит из поверхностного горизонтального слоя толщиной h с удельным сопротивлением ρ_1 и однородной подпочвы бесконечной глубины с удельным сопротивлением ρ_2 . При этом достаточно ограничиться рассмотрением небольшого электрода полусферической формы, имеющего радиус r , достаточно малый по сравнению с толщиной поверхностного слоя h .

На рис. 12.6 представлена схема растекания тока по земле для точечного электрода при различных соотношениях ρ_1 и ρ_2 . В непосредственной близости от поверхности гради-

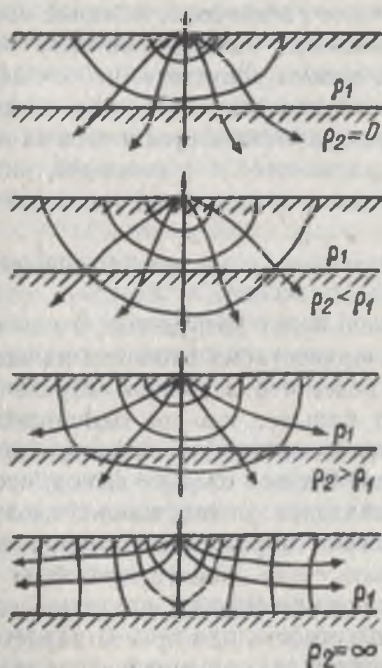


Рис. 12.6. Электрическое поле вокруг точечного электрода при различных значениях удельного сопротивления почвы ρ_1 и подпочвы ρ_2

енты потенциала остаются практически такими же, как и для однородного грунта с удельным сопротивлением ρ_2 .

По мере же удаления от электрода начинает сказываться все в большей степени влияние проводимости нижележащего слоя. Это влияние приводит к снижению градиентов потенциала, если нижележащий слой обладает большей проводимостью, чем поверхностный слой, и к их повышению в обратном случае.

В результате этого влияния в обоих рассматриваемых случаях значения градиентов потенциала будут приближаться к значению, присущему однородному грунту с удельным сопротивлением ρ_2 , но с той разницей, что в первом случае это будет проходить более интенсивно, чем во втором.

Для вертикального стержня, который частью своей длины h находится в почве с удельным сопротивлением ρ_1 , а другой частью, равной $l-h$ (где l — длина стержня), — в грунте с удельным сопротивлением ρ_2 , можно допустить, что грунт как бы является однородным, обладающим удельным сопротивлением ρ_2 , для чего длину h стержня, расположенного в токоведущем слое, просто надо уменьшить в отношении $\rho_2 > \rho_1$.

Для пластинчатого электрода, который можно уподобить поверхностной пластине, толщина которой намного превышает значение h , можно допустить, что он лежит непосредственно на подпочвенном слое с удельным сопротивлением ρ_2 , и его сопротивление заземления увеличить на значение сопротивления цилиндра высотой h и сечением, равным площади поверхности пластины, обладающей удельным сопротивлением ρ_1 .

Если у нижележащего слоя удельное сопротивление больше, чем у поверхностного слоя, т. е. $\rho_2 > \rho_1$, то проникновение линий тока в землю будет затруднено, и они станут распространяться по поверхностному слою тем дальше, чем больше ρ_2 . Совершенно ясно, что в данном случае сопротивление заземления будет больше, чем при однородном грунте с ρ_1 , а градиенты потенциала вокруг заземлителя окажутся несколько меньшими. Отсюда следует вывод, что чем меньшей проводимостью обладает нижележащий слой, тем большее значение приобретают параметры поверхностного слоя, что и надо учитывать при конструировании заземляющих устройств. В предельном случае, когда нижележащий слой имеет малую проводимость или просто является изолятором [см. ниже формулу (12.14)], сопротивление заземления будет бесконечно велико. Из этого следует, что для растекания тока на бесконечные расстояния, когда в глубь земли он проник-

нута не может, требуется бесконечно большое напряжение. Можно исключить гипотетический предельный случай, когда подпочва является абсолютным изолятором, и принять, что ток вынужденно распространяется на далекие расстояния главным образом по поверхностному слою. Тогда необходимо учитывать уменьшение значения тока, протекающего по этому слою, так как с увеличением расстояния все большая часть тока будет стекать в землю, проникая вглубь.

Приближенно средний путь тока по поверхностному слою земли, т. е. расстояние от небольшого электрода до того места на поверхностном слое, где остается только половина полного значения тока, определяется как

$$x = \frac{\rho_2}{\rho_1} h. \quad (12.14)$$

В том случае, когда, например, ρ_2 в 10 раз больше ρ_1 , средний путь тока в проводящем поверхностном слое равен примерно десятикратной толщине этого слоя. Значение градиента потенциала на этом расстоянии составляет половину его значения, которое было бы определено в предположении абсолютно непроводящего подпочвенного слоя, или половину его значения, которое отвечает условиям однородного грунта с удельным сопротивлением ρ_2 , как у подпочвенного слоя. Графики, приведенные на рис. 12.7, хорошо иллюстрируют сказанное. При распространении тока на большие расстояния поверхностный слой земли составляет все меньшую долю в общем стекании тока в землю. Поэтому при определении значений потенциалов и их градиентов практически можно исходить из того, что грунт является однородным и обладает удельным сопротивлением ρ_2 .

В тех случаях, когда заземляющее устройство велико по сравнению с толщиной проводящего слоя, последний не влияет на значение сопротивления заземления, но сказывается на снижении местных градиентов потенциала непосредственно вблизи заземлителей.

Если подпочвенный слой обладает большей проводимостью, чем поверхностный слой, то заземлители, находящиеся в поверхностном слое, воздействуют друг на друга в гораздо меньшей степени, чем в случае, когда поверхностный слой является более проводящим.

А. И. Якобс предложил проводить расчеты сложных заземляющих устройств в неоднородных грунтах по разработанному им статистическому методу с использованием ЭВМ. Суть метода заключается в нахождении тесной вероятностной связи (корреляции) между электрическими и некоторы-

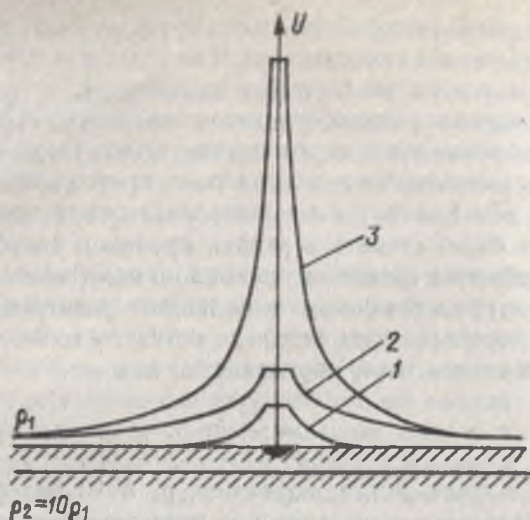


Рис. 12.7. Потенциал вокруг заземляющего электрода
 1 — однородная почва с удельным сопротивлением ρ_1 ; 2 — однородная под-
 почва с удельным сопротивлением $\rho_2 = 10 \rho_1$; 3 — почва с ρ_1 и подпочва с
 $\rho_2 = 10 \rho_1$

ми обобщенными конструктивными (геометрическими) параметрами.

Погрешность расчетов по статистическому методу по сравнению с расчетами по точному методу определения наведенного потенциала составляет в среднем 10—15 % при максимальной погрешности не выше 30 %.

Расчет сложных заземляющих устройств, расположенных в неоднородных грунтах, очень трудоемок. Однако указания, содержащиеся литературных источниках, позволяют выполнить его правильно.

12.6. Особенности проектирования заземлений закрытых распределительных устройств

Заземление закрытых распределительных устройств должно проектироваться и выполняться с учетом электропроводности пола. Полы, обладающие большим удельным сопротивлением, существенно влияют на распределение потенциалов. Это заставляет вносить в расчет как бы последовательно включенное с ногами человека большое сопротивление. При

этом надо считаться и с такими факторами, как увлажненность пола и его загрязненность.

Электрофизические характеристики полов в зависимости от их материала рассмотрены в § 10.6. Поэтому здесь ограничимся тем, что приведем значения коэффициентов прикосновения, с помощью которых можно учесть изолирующие свойства полов.

При отсутствии каких-либо специальных устройств для выравнивания потенциалов значение коэффициента прикосновения следует принимать равным 0,25 для железобетонных и 0,5 для кирпичных зданий. При этом арматура железобетона обязательно должна быть присоединена к заземляющей сети подстанции, а вокруг здания, на расстоянии примерно около 1 м от стен, уложена заземляющая полоса. Это соответствует требованиям действующих правил и способствует улучшению распределения потенциалов. Для первого этажа коэффициент прикосновения равен 0,38—0,45, для второго и выше 0,02—0,06.

12.7. Определение проводимости естественных заземлителей

Кабели. Кабель, имеющий броню или свинцовую оболочку, можно рассматривать как протяженный заземлитель. Расчет его сопротивления заземления возможен по методике, разработанной П. Е. Шпором в Ленэнерго. Для одиночного кабеля действительна формула, предложенная нами,

$$R = k \sqrt{\rho_0 r} \operatorname{cth} \left(\frac{1}{k} \right) \left(\frac{1}{t} \sqrt{\frac{r}{\rho}} L \right), \quad (12.15)$$

где L — длина кабеля, м; t — глубина укладки кабеля в землю (расстояние от оси кабеля до поверхности земли), см; r — сопротивление переменному току 1 м оболочки кабеля, Ом; ρ_0 — удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$$k = \sqrt{\frac{\lg [4,66 \rho_0 / (p^2 t)]}{\lg (4,15 / p)}}.$$

здесь $p = 2r_0 \sqrt{r / \rho_0}$; r_0 — эквивалентный любой радиус сечения заземлителя (приблизительно равный радиусу окружности, равновеликой периметру сечения). Для нескольких кабелей, отходящих от одного источника питания, коэффициент k уменьшается.

В качестве средних значений при определении k можно использовать следующие значения удельного сопротивления: $15 \cdot 10^{-4}$ Ом·м для брони кабелей; $21 \cdot 10^{-4}$ Ом·м для свинцовой оболочки кабелей; $50 \cdot 10^{-4}$ Ом·м для стальных труб. Значения r_0 могут быть взяты из каталогов.

При определении сопротивления заземления вновь прокладываемых кабелей с джутовой оболочкой в расчет должны быть введены следующие коэффициенты:

Расчетное удельное сопротивление грунта, Ом·м	50	100	200	500	1000	2000
Коэффициент, учитывающий наличие джутовой оплетки	6,0	2,5	2,0	1,4	1,2	1,05

Система «трос — опора». Сопротивление заземления этой системы определяется для участков линии электропередачи с числом опор больше 20 по формуле

$$R_z = \sqrt{r_T R_0}, \quad (12.16)$$

а для участков линий электропередачи с числом опор менее 20 — по формуле

$$R_z = \sqrt{r_T R_0} \operatorname{ctg} \left(h \sqrt{\frac{r_T}{R_0}} \right), \quad (12.17)$$

где R_0 — сопротивление заземления опоры; r_T — активное сопротивление троса на длине пролета. Здесь предполагается, что тросы заземлены на каждой опоре, а длины пролетов и сопротивления заземления их опор одинаковы. Так как натурные условия этому не соответствуют, то формулы в том виде, в котором они даются, являются приближенными; однако ошибка не превосходит 5 %.

Железобетонные фундаменты. Возможность использования для заземления железобетонных оснований подстанций, так же как и оснований опор линий электропередачи, в СССР и за рубежом всесторонне изучена. Важность этого вопроса объясняется не только широким распространением таких оснований, но и тем, что в обводненных грунтах бетон даже после схватывания не теряет своей проводимости. Из работ на эту тему, опубликованных в отечественной литературе, для учета сопротивления заземления фундаментов лучше всего использовать статью [35].

Сделаем некоторое обобщение. Территория подстанции в отношении сооружения заземляющих устройств представ-

ляет собой площадь, на которой размещается большое число глубоких заземлителей, могущих обеспечить довольно значительную проводимость. Расположение заземляющих полос, задаваемое произвольно планом размещения оборудования, является дополнительным средством достижения безопасности за счет выравнивания потенциалов на территории подстанции и увеличения проводимости заземляющего устройства подстанции в целом.

Глава тринадцатая

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРООЖОГОВ

13.1. Почему это важно

Анализ наиболее типичных случаев электротравм, принятый в предыдущих главах книги в качестве одного из методических приемов исследования явления электротравматизма, показывает, что среди травм, сопутствующих поражению электрическим током, наиболее частыми являются ожоги. Всегда трудно предсказать исход и отдаленные последствия электротравмы, при наличии же ожогов оценка тяжести поражения, прогноз сроков и результатов лечения многократно усложняются. Обратимся к некоторым из приведенных выше примеров.

Пострадавший (мальчик 11 лет — см. пример 4.28) поступил в специализированную клинику с электроожогами 36 % поверхности тела лишь на 10-й день после электротравмы. Несмотря на немедленно предпринятые меры интенсивной терапии и экстренное хирургическое вмешательство, некроз мягких тканей, внешне выглядевших жизнеспособными, продолжал прогрессировать; периодически возникали вторичные кровотечения из ран. В дальнейшем развились сепсис и перитонит. Мальчик погиб. В другом же случае (см. пример 4.29) годовалая девочка, поступившая в клинику через 7 дней после электротравмы с глубокими ожогами кистей рук и вторичными кровотечениями из ожоговых ран, потеряла лишь ногтевую фалангу одного из пальцев. Остальные раны после замещения дефектов аутоотрансплантатами успешно зажили, и девочка была выписана из клиники по выздоровлении.

Длительность лечения электроожогов, во многих случаях непредсказуемость исхода, неожиданные осложнения, нару-

шения функций жизненно важных систем и органов убеждают в том, что электроожоги относятся к сложнейшим поражениям человеческого организма. Приведем еще несколько примеров, подтверждающих это положение.

Пример 13.1. Электрик К., 28 лет, поступил в клинику через час после электротравмы (ток напряжением 6 кВ). Сознание затуманено, пульс — 92 удара в минуту, слабого наполнения и напряжения. Тоны сердца приглушены. Артериальное давление 135/70 мм рт. ст. Число дыхательных движений — 27 в минуту. Со стороны брюшной полости патологических изменений не выявлено.

В области левого предплечья — большой дефект на передненаружной поверхности (след входа электрического тока), обугливание мышц и костей, обнажены локтевая и лучевая кости. Кисть холодна на ощупь, чувствительности нет. В левой подмышечной области — след прохождения электрического тока (участок серо-белого цвета 6×10 см). Плечо отечно, кожа нечувствительна до его средней трети. На стопах обнажены концевые фаланги первых пальцев.

Клинический диагноз: электротравма, электроожоги левой верхней конечности и обеих стоп, в общей сложности обожжено около 10 % всей площади кожи.

После того как удалось улучшить общее состояние больного, произведена операция в области левого предплечья и плеча. На четвертый день после электротравмы внезапно началось кровотечение из плечевой артерии. При ревизии раны в области плеча установлено обширное омертвление почти всех мышц, в том числе и большой грудной мышцы. В связи с этим произведена перевязка подключичной артерии, плечо ампутировано на границе верхней и средней трети. При осмотре и гистологическом исследовании препарата установлено разрушение наружной пластинки плечевой кости, множественные кровоизлияния в костном мозгу. Магистральные сосуды предплечья в области локтевого сустава тромбированы. Стенка плечевой артерии стала хрупкой.

На 21-й день с момента травмы произведена экзартикуляция I, II, III пальцев обеих стоп, иссечены нежизнеспособные ткани на тыльной и подошвенной поверхностях левой стопы, вскрыты гнойные затеки. Однако ткани в области культи левого плеча и обеих стоп оставались нежизнеспособными, гнойные затеки развились, возник сепсис, из-за чего пришлось прибегнуть к реампутации плеча и ампутации голеней. Больной выписан на 132-й день после электротравмы с потерей трудоспособности.

Пример 13.2. В ожоговое отделение одной из ведущих клиник Ленинграда поступил электрик, получивший электротравму при касании рукой шины, находившейся под напряжением 10 кВ. Возникшая дуга причинила ему серьезные ожоги руки и обеих ног. Пострадавший получил экстренную медицинскую помощь в объеме, предусмотренном для больных с глубокими термическими ожогами. Развитие некрозов в ожоговых ранах привело к необходимости ампутации руки и ног. После достаточно длительного лечения все три культи стали

заживать и пострадавшего уже готовили к выписке, так как его общее состояние было вполне удовлетворительным. Ничто не вызывало опасений, но внезапно наступила смерть. При вскрытии, продолжавшемся несколько часов, не удалось установить никаких явных причин гибели. Диагноз гласил: «Сердечная недостаточность, вызванная, по видимому, электротравмой». Столь неопределенное патологоанатомическое заключение явилось, очевидно, следствием того, что не было произведено серьезного гистологического исследования клеток центральной нервной системы, несомненно, пораженных в результате электротравмы.

Данный пример убедительно показывает, что электротравма — это поражение организма в целом, прежде всего поражение центральной нервной системы. Вот почему пострадавшие с электроожогами наряду с лечением локальных поражений в обязательном порядке нуждаются в наблюдении и специализированной помощи невропатолога. Такой подход в большинстве случаев приводит к успеху.

Пример 13.3. Опишем лечение электроожога, начавшееся спустя длительное время после травмы. И здесь видна специфика поражения. Диспетчер подстанции К., 38 лет, поступил в клинику через 45 дней после травмы. Госпитализирован по поводу гранулирующей раны в области первого (большого) пальца левой кисти. Основная фаланга пальца обнажена, пястно-фаланговый сустав вскрыт. Электротравму получил во время работы: прикоснулся левой кистью к оголенному проводу, который находился под напряжением 220 В. В клинике после подготовки раны произведена операция — иссечение остатков неотторгнувшихся мертвых тканей и итальянская пластика (лоскут выкроен в области левой половины брюшной стенки).

Выписан из клиники по выздоровлении через 55 дней после поступления и через 100 дней после травмы с удовлетворительной функцией левой кисти.

Пример 13.4. Электромонтер В., 35 лет, поступил в клинику на второй день после электротравмы в крайне тяжелом состоянии с выраженным двигательным возбуждением, без сознания. На работе взялся за провод, находившийся под напряжением 380 В, и тотчас потерял сознание.

Местно: на лбу (больше справа) — обширная ожоговая рана (20×6 см), края ее гиперемизированы, приподняты. В центре раны — некротический струп черного цвета. Отек в области правого глаза. На передней поверхности шеи, в проекции щитовидной железы — рана (4×5 см), в центре которой — участок некроза темного цвета.

Первые восемь дней, несмотря на активно проводившееся лечение, общее состояние больного оставалось тяжелым. На девятый день были иссечены некротические ткани на передней поверхности шеи. Магистральные сосуды шеи (общая сонная артерия и яремная вена), хотя и располагались на дне раны, повреждены не были. Передняя поверхность щитовидной железы некротизирована, в связи с чем

произведена ее частичная резекция. Хирургическая обработка ожоговой раны на шее закончена наложением глухого шва. Через месяц произведена трепанация наружной пластинки лобной кости. Через полтора месяца вся омертвевшая костная ткань передней стенки лобных пазух отторглась, и рана покрылась сплошным слоем грануляций. Через семь месяцев с момента травмы после выскабливания грануляций и слизистой лобных пазух рана закрыта с помощью итальянского лоскута, выкроенного на плече. Еще через 27 дней осуществлен второй этап итальянской пластики. Выписан в хорошем состоянии.

Пример 13.5. Больной М., 28 лет, поступил в клинику с ампутационными культями обоих плеч через пять месяцев после электроожога. В момент поступления общее состояние пострадавшего было вполне удовлетворительным.

Местно: на передненаружных поверхностях культей обоих плеч — гранулирующие раны размером справа 20×5 см и слева 18×6 см, дном которых являются обнаженные омертвевшие участки плечевых костей. На рентгенограммах видны демаркационные линии между пораженными и здоровыми участками костей.

Благодаря своевременно принятым мерам удалось предотвратить реампутацию и сохранить длину культей. Через 3,5 месяца после поступления в клинику выписан по выздоровлению.

Пример 13.6. Электрик К., 26 лет, поступил в клинику с электроожогами головы, правого предплечья и III (среднего) пальца левой кисти через 3,5 месяца после травмы. Общее состояние удовлетворительное.

Местно: в правой затылочно-теменной области — рана размером 6×6 см, дном которой является омертвевшая кость. В нижней трети правого предплечья на участке 6 см обнажена омертвевшая локтевая кость. На тыле основной фаланги пораженного пальца во всю ее длину — гранулирующая рана, на дне которой видна омертвевшая кость.

Рентгенограмма определила в нижней трети локтевой кости участок поражения длиной 6,5 см и четкую демаркационную линию между здоровыми и омертвевшими костными тканями.

Через две недели после поступления К. в клинику омертвевшие участки костей удалены.

Спустя 140 дней после электротравмы К. выписан в удовлетворительном состоянии, но со значительной потерей трудоспособности.

Другие наблюдения показали, что последствия электротравмы в ряде случаев проявляются спустя много лет с момента происшествия. У одного пострадавшего они обнаружались через 31 год (!) специфическими невротическими реакциями, проявившимися в области рубцов.

Пример 13.7. Электрик Д., 43 лет, был доставлен в клинику военнопольевой хирургии Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова на восьмой день после происшествия в крайне тяжелом состоянии. Травму получил во время приемки из ремонта подстанции, находящейся под напряжением 10 кВ. При осмотре больного и снятии с него повязок было обнаружено: а) отсутствие (отрыв) правой кисти

и омертвление всей остальной части этой же конечности с наметившейся демаркационной линией, простиравшейся через подмышечную впадину в область плечевого сустава; б) омертвление правой голени с обугливанием стопы; в) омертвление нижней половины левой голени с обугливанием стопы; г) следы электрометок на лице, шее и передней поверхности грудной клетки. Ввиду тяжелой интоксикации, вызванной продуктами распада омертвевших тканей конечностей и присоединившейся инфекцией, пострадавшему на третий день после его поступления в клинику была произведена ампутация правого бедра на уровне средней трети, а на восьмой день — ампутация нижней трети левого бедра. На 24-й день после травмы наступила смерть; ее могло бы и не быть в случае своевременно начатого специализированного лечения.

Приведенные примеры убедительно показывают, что электроожоги излечиваются значительно труднее и медленнее обычных термических, сопровождаются внезапными кровотечениями, глубокими некрозами отдельных участков тела, хотя нагрев тканей при электротравме во многих случаях ниже, чем при термических поражениях. Это объясняется тем, что при электроожоге на живую ткань помимо термического поражающего фактора воздействует и энергия электрического поля (тока), вызывая, прежде всего через акупунктурные зоны, глубокие и часто необратимые поражения периферических и центральных отделов нервной системы.

Длительность и результат лечения электроожогов во многом определяются качеством организации медицинской помощи пострадавшим, своевременностью ее начала, преемственностью на всех этапах, выбором наиболее рациональной тактики проведения и объема медицинских мероприятий в самые ранние сроки после травмы, возможностью объективной (приборной) экспресс-диагностики глубины поражения начиная с этапа первой медицинской помощи.

Как в СССР, так и за рубежом система специализированной помощи обожженным, в том числе и электроожогами, непрерывно совершенствуется (историю создания этой системы и анализ ее современного состояния читатель может найти в коллективной монографии ведущих хирургов кафедры термических поражений ВМА имени С. М. Кирова [52]). Значительный прогресс в лечении ожогов, достигнутый в нашей стране за два последних десятилетия, обусловлен последовательным выполнением мероприятий, направленных на создание стройной государственной системы этапной помощи обожженным, и в первую очередь организацией специализированных лечебных заведений — ожоговых центров, составивших научную и клиническую базу исследований в этой

области медицины. Хирургами отечественных ожоговых центров и ожоговых отделений разработаны и внедрены в медицинскую практику эффективные методы хирургического лечения глубоких ожогов, в том числе в раннем посттравматическом периоде, метод открытого лечения ожогов в управляемой абактериальной среде, различные модификации кожной пластики, в том числе с использованием приемов и техники микрохирургии, новые методы интенсивной терапии ожоговых больных и многое другое.

Однако все перечисленные достижения относятся к этапу специализированной помощи. Практика показывает и приведенные выше примеры убедительно подтверждают это, что самыми «узкими» местами в системе помощи обожженным являются своевременность перехода к этапу специализированной помощи и обеспечение преемственности лечения. Действительно, один из пострадавших (см. пример 13.3) поступил в специализированную клинику лишь через 1,5 месяца после травмы, другой (см. пример 13.6) — через 3,5 месяца, третий (см. пример 13.5) — даже через 5 месяцев. Поздние сроки начала специализированной помощи не только существенно увеличивают длительность лечения, значительно ухудшают его функциональные результаты, но в ряде случаев могут привести и к гибели пострадавшего (см. пример 13.7). Подобные ситуации, достаточно типичные, могут возникать по двум причинам. Во-первых, сеть специализированных лечебных учреждений, несмотря на ее непрерывное развитие, охватывает далеко не всю территорию страны. Так, Б. С. Вихриев [52] указывает, что в отдельных областях и автономных республиках нет вообще ни одного ожогового отделения или центра, что является основной причиной несвоевременности оказания специализированной медицинской помощи обожженным в этих регионах. Вторая причина, отчетливо прозвучавшая в выступлениях специалистов на III Всесоюзной конференции «Современные средства первой помощи и методы лечения ожоговой болезни» (Москва, 11—12 декабря 1986 г.), заключается в том, что диагностика глубины ожогов на этапах первой медицинской и первой врачебной помощи, а следовательно, прогноз течения ожоговой болезни, выбор объема и тактики первой помощи, обеспечивающих преемственность лечения, своевременность принятия решения о необходимости специализированной помощи представляют трудноразрешимую задачу для врача общего профиля.

Все вышесказанное в равной степени относится и к электроожогам, и к ожогам любого другого происхождения. В контексте же основ электробезопасности следует подчер-

знать, что два из трех основных количественных показателей, характеризующих электротравматизм, а именно (см. § 2.2) коэффициент тяжести, определяемый числом дней потери трудоспособности, пришедшихся за определенный промежуток времени на 1000 работающих, и коэффициент средней продолжительности одного случая потери нетрудоспособности, существенно зависят от эффективности медицинской помощи пострадавшим.

Изложение и краткий анализ проблем диагностики и лечения электроожогов, обсуждение перспектив их решения составляют содержание настоящей главы. Прежде чем перейти к дальнейшему изложению, необходимо отметить следующее. Автор главы А. Н. Новиков — специалист по электронному медицинскому приборостроению, поэтому изложение сугубо врачебных аспектов диагностики и лечения ожогов носит обзорный характер, хотя и отражает точку зрения автора, сложившуюся в результате многолетнего изучения указанных проблем, их обсуждения со специалистами-медиками. Та же часть главы, которая посвящена приборным средствам экспресс-диагностики ожогов, и в частности методу инфракрасного зондирования, написана по результатам собственных исследований, выполненных под руководством В. Е. Манойлова.

13.2. Классификация ожогов

Что мы относим к электроожогам. Обсуждение в первой главе книги основных понятий и определений из области травматологии выявило односторонность и недостаточную четкость многих из них. В полной мере сказанное относится и к специальной терминологии, например к таким терминам, как *ожог*, *электроожог*, *электротравма*, четких определений которых, позволяющих однозначно дифференцировать эти понятия, на сегодня нет.

Содержание термина *электротравма* подробно обсуждалось выше (см. § 1.1). Согласно В. Е. Манойлову под *электротравмой* следует понимать нарушение анатомических соотношений и функций тканей и органов, сопровождающееся местной и общей реакцией организма и вызванное ненормальным состоянием электро- и радиооборудования или электрических сетей. Такая формулировка полностью охватывает и понятие *электроожог*. Так что же, *электротравма* и *электроожог* — синонимы? Отнюдь нет. Электроожог, несомненно, — электротравма, но далеко не каждая электротравма сопро-

вождается электроожогом. Как же разделить два этих столь близких понятия?

Рассмотрим пример. В результате аварии электрооборудования, скажем, короткого замыкания, произошло возгорание элементов конструкции, одежды обслуживающего персонала. Пострадавшие при аварии люди получили ожоги, в том числе глубокие, хотя электрическая цепь через их тела не возникала. Первопричина травмы — ненормальное состояние электрооборудования, следовательно, по определению это электротравма. Но относить ли полученные пострадавшими повреждения к категории электроожогов или же к категории термических поражений? На основании принятой сегодня системы терминов и определений дать однозначный ответ на этот вопрос невозможно.

Нечеткость терминологии приводит к погрешностям статистического учета электротравм, анализа причин электротравматизма, нарушает работу системы этапной помощи пострадавшим, затрудняет организацию лечебного процесса. Поэтому, прежде чем приступить к обсуждению проблем диагностики и лечения электроожогов, раскроем содержание терминов, которые будут использоваться в дальнейшем.

В настоящее время понятие *ожог* трактуется очень широко, хотя первоначально этим термином обозначали лишь травмы, вызванные чрезмерным воздействием тепловых факторов внешней среды на человека. По мере появления новых источников энергии, развития техники, внедрения в производство новых технологий расширялся и спектр травм, обозначаемых понятием *ожог*. Так, появились и стали общепринятыми термины *химический ожог*, *электроожог*, *лучевой*, или *радиационный, ожог*, в подавляющем большинстве случаев обозначающие травмы, не имеющие никакой связи с тепловым воздействием на биологические ткани. Единственным общим признаком этих столь разнородных повреждений является наличие более или менее выраженного некроза биологических тканей, что, конечно же, не может оправдать использование для них единого термина *ожог*. По мнению автора, правильнее было бы говорить *химическая травма*, *электротравма*, *лучевая*, или *радиационная, травма* (вполне допустима замена термина *травма* синонимом *поражение*), понимая при этом, что *травма* — это нарушение структуры, строения и функций биологических тканей, сопровождающееся местной реакцией организма, в то время как общую реакцию организма на травму целесообразно (да и общепринято) обозначать термином *болезнь*. Например: термическая травма (ожог), но ожоговая болезнь; химическая травма, но

отравление (общая реакция организма на химическую травму); лучевая травма, но лучевая болезнь. По аналогии мы сказали бы: электротравма и электроболезнь.

В такой системе терминологии слово *ожог* следует употреблять лишь в том случае, когда в результате преобразования энергии травмирующего воздействия происходит выделение тепла, являющегося непосредственным поражающим биоткани фактором. Соответственно *электроожогом* будем называть термическую травму, вызванную ненормальным состоянием электро- и радиооборудования или электрических сетей. Во всех остальных случаях будем использовать термин *электротравма*, причем в случаях совмещенного поражения электрическим током и термическим фактором будем употреблять термин *электротравма, сопровождающаяся электроожогом*.

Механизмы поражения биотканей при электротравмах. Настало время подробнее остановиться на механизмах поражения биотканей при электротравмах, электроожогах и электротравмах, сопровождающихся электроожогами. Раскрытие этих механизмов позволит более четко выделять электроожоги в совокупности электротравм, поможет определить основной принцип классификации электроожогов.

Поражающее действие электрического тока при его прохождении через биоткани проявляется в тепловом, электрохимическом, механическом и биологическом эффектах.

Тепловое действие электрического тока (согласно закону Джоуля — Ленца) определяется сопротивлением биологических тканей, значением тока и временем существования электрической цепи через тело человека. Тепло, образующееся при прохождении тока через биоткани, вызывает перегрев и гибель клеток, причем наиболее выраженные изменения наблюдаются на кратчайшем пути тока. Поражения кожи в местах входа и выхода тока различны по форме и размеру в зависимости от характера контакта с токонесущими проводниками: от точечных «меток» до полного обугливания тканей, а распространенность некроза кожи обычно меньше, чем глубже лежащих тканей. Степень поражения тканей пропорциональна их проводимости, изменяющейся в широких пределах. Биологические ткани по удельному сопротивлению в порядке его возрастания распределяются следующим образом: нервы, кровеносные сосуды, мышцы, кожа, сухожилия, жировая ткань, кости. Соответственно два типа биотканей, обладающих наименьшим полным сопротивлением, а именно нервные клетки и кровеносная система, подвержены наиболее обширным и глубоким поражениям (механизмы поражения

периферической и центральной нервной системы, кровеносной системы подробно рассмотрены в шестой и восьмой главах).

Тепловые эффекты при замыкании электрической цепи через тело человека всегда сочетаются с электрохимическими и биологическими эффектами.

Электрохимическое действие электрического тока заключается прежде всего в агрегации тромбоцитов и лейкоцитов. Эти конгломераты вызывают тромбоз небольших кровеносных сосудов, что способствует прогрессированию некроза и может быть причиной тяжелых тромбозмболических осложнений, например очаговой пневмонии и даже инфаркта легкого. Другой электрохимический эффект заключается в изменении концентрации интра- и экстраклеточных ионов вследствие их перемещения в поле электрического тока. В результате изменяются мембранные потенциалы, поляризуются крупные органические молекулы, такие, как белки, что приводит к их коагуляции, следовательно, к гибели тканей. Следует отметить, что наиболее сильный электрохимический эффект вызывается постоянным или низковольтным переменным током.

Именно электрохимические эффекты поражения электрическим током, вызывающие обширные нарушения кровоснабжения тканей за счет тромбоза сосудов, обуславливают, по-видимому, главную особенность электротравм — несоответствие между распространенностью поражения кожи и глубже лежащих тканей. В отличие от термических ожогов при поражениях электрическим током мышцы, сухожилия, кровеносные сосуды и нервные волокна гибнут на значительно большем протяжении, чем кожа над ними. Кроме того, поражение стенок сосудов приводит к вторичным, иногда смертельным кровотечениям в поздние сроки (на второй — четвертой неделе после травмы). Коагуляция сосудов в зоне электротравмы ведет к ишемии и омертвлению тканей далеко за пределами зоны первичного некроза. Нарушениям кровообращения способствуют также выраженный отек ткани и спазм сосудов в ответ на раздражение электрическим током.

Электрохимические эффекты являются одной из основных причин биологических проявлений поражения электричеством. Нарушения функций центральной и периферической нервной системы объясняются поляризационными процессами в клеточных мембранах и нервных волокнах. В результате возникают нарушения проводимости в сердечной мышце, тетанические сокращения мускулатуры, иногда настолько интенсивные, что сопровождаются разрывами мышц и даже переломами костей (механический эффект поражения). В нервных стволах, расположенных на пути прохождения тока,

наблюдается расщепление их на отдельные тонкие волокна, разрывы аксонов [52]; нарушается работа коры головного мозга, особенно ассоциативных областей и других нервных центров.

Электроожоги, при которых электрическая цепь через тело пострадавшего не возникает, представляют собой разновидность термических ожогов. К таким электроожогам относятся, например, ожоги электрической дугой. Очень короткая по времени вспышка вызывает, как правило, поверхностные ожоги, но в ряде случаев, особенно при воспламенении одежды, возможны и тяжелые, глубокие ожоги. Глубина поражения определяется соотношением между температурой поражающего агента и длительностью воздействия. Так, при мгновенном воздействии даже очень высоких температур глубина поражения может быть небольшой. В то же время длительный контакт с относительно низкотемпературными агентами нередко сопровождается гибелью не только кожи, но и более глубоких анатомических структур. Инфракрасные лучи обладают способностью проникать в ткани на глубину до 5 мм, прогревая их до 50—60 °С, что уже достаточно для гибели клеток (в монографии В. Рудовского с соавторами [69] температура 50 °С, вызывающая некроз эпидермиса уже через 3 мин воздействия, принимается пороговой).

Таким образом, во всем многообразии вариантов и сочетаний электротравм и электроожогов возможен весь спектр поражений тканей по глубине — от самых поверхностных до наиболее глубоких. Поскольку течение электроожогов подчиняется общим закономерностям (развитие воспаления, нагноения, отторжение некротизированных тканей, образование грануляций, эпителизация, рубцевание) [69], а проблемы диагностики и лечения электроожогов в основном идентичны этим же проблемам применительно к термическим поражениям, химическим и радиационным травмам, то в дальнейшем изложении речь будет идти об ожогах в общем смысле этого слова. Лишь в необходимых случаях будет выделена специфика электроожогов.

Классификация ожогов. Возможно несколько принципиально различных подходов к классификации ожогов. Например, классификация по причинному фактору. С этой точки зрения принято выделять термические, химические, радиационные (лучевые) и электроожоги (о терминологических нюансах такой классификации сказано выше). В свою очередь, в группе термических ожогов выделяют ожоги пламенем, ожоги от контакта с раскаленными предметами, ожоги на-

гретыми жидкостями (обычно кипятком) и паром. Каждая из перечисленных групп ожогов имеет особенности клинической симптоматики, течения раневого процесса. Так, при ожогах пламенем или раскаленными предметами возникает, как правило, коагуляционный (сухой) некроз, при котором пораженная кожа плотная, сухая, темно-красного, бурого или почти черного цвета. При ошпаривании развивается влажный некроз, при котором пораженная кожа отечна, рыхла, цвет ее может быть от белого до темно-красного. Рана очищается от влажного некроза на 10—12 дней раньше, чем от коагуляционного.

Ожогам другими агентами присущи свои особенности клинических проявлений. Таким образом, классификация по причинному фактору имеет смысл с точки зрения прогноза особенностей течения раневого процесса и сроков отторжения некротизированных тканей.

Другой подход — классификация по локализации ожогов. Такая классификация целесообразна прежде всего применительно к глубоким поражениям, так как хирургическая тактика имеет специфические особенности при лечении ожогов различной локализации.

Возможны и другие принципы классификации, основанные на некоторых характерных особенностях разных категорий ожогов. Однако такие классификации мало распространены из-за своей специфичности.

Наиболее универсальная классификация по глубине поражения базируется на современных представлениях о слоистой структуре кожи. Следует четко понимать, что глубина ожога и толщина слоя пораженной ткани — не одно и то же. Глубина ожога определяется числом пораженных слоев кожи независимо от толщины каждого слоя. В зависимости от глубины поражения принято выделять степени ожогов. Некоторые из используемых в мировой практике классификаций ожогов по степеням приведены в табл. 13.1 [69]. Анализ таблицы позволяет заметить значительную вариабельность числа степеней и терминологии, хотя каждая классификация, несомненно, выполняет свою роль в том ожоговом центре, где она была предложена.

В СССР используется классификация ожогов по степеням (I, II, IIIa, IIIb, IV), принятая на XXVII Всесоюзном съезде хирургов в 1960 г. (рис. 13.1) [52]. Каждая из приведенных классификаций имеет свои недостатки. Например, в отечественной классификации ожоги I и II степени вследствие легкого их разграничения по внешним признакам относят к двум разным классам, хотя анатомически они представляют

Таблица 13.1. Различные варианты классификации ожогов по степеням

Клиническое состояние	Анатомические изменения	Варианты классификации						
		Поверхностные ожоги	Поверхностные ожоги	Поверхностные ожоги	Поверхностные ожоги	Поверхностные ожоги	Поверхностные ожоги	Поверхностные ожоги
Эритема	Некроз эпидермиса	Поверхностные ожоги		I	I	I	I	I
Водяры		Поверхностные ожоги		II	II	II	II	IIa
Частичный некроз кожи	Поверхностный некроз кожи, подлежащий слой сохранен	Поверхностные ожоги		III		III	IIIa	IIIb
Тотальный некроз кожи	Некроз всей кожи	Глубокие ожоги		Глубокие ожоги		III	IIIb	III
Некроз глуболежащих органов	Некроз глуболежащих органов с анатомическими их изменениями	Глубокие ожоги		Глубокие ожоги		IV (обугливание)	V (мягкие ткани) VI (кости)	IV

ожогами; третий — специализированные ожоговые отделения, куда поступали сразу после травмы или переводились из других лечебных учреждений обожженные с глубокими поражениями (до 15 % поверхности тела) и поверхностными (свыше 35 % поверхности тела). Во Всесоюзный ожоговый центр (четвертый этап) должны были направляться пострадавшие с глубокими ожогами площадью более 15 % поверхности тела, однако, при отсутствии несовместимых с жизнью поражений. Имеющие такие поражения должны были лечиться на втором или третьем этапе при консультативной помощи специалистов ожогового центра [52].

За двадцать лет развития системы лечения обожженных достигнуты значительные успехи. Ожоговые центры созданы почти во всех столицах союзных республик, крупных городах. В целом по стране в настоящее время имеется более ста ожоговых центров и отделений, и с каждым годом их число увеличивается. Однако даже в республиках и областях, располагающих наибольшим числом специализированных коек, часть обожженных все же лечится в общехирургических отделениях. Если это оправданно при поверхностных поражениях, то при глубоких ожогах необходима специализированная помощь. К сожалению, она еще не всегда бывает своевременной. Отдельные области и автономные республики до сих пор не имеют отделений для обожженных. И хотя в СССР острота проблемы выражена меньше, чем в других странах, необходимость дальнейшего развития и совершенствования специализированной помощи пострадавшим от ожогов не вызывает сомнения [52].

Следующая проблема, на которой хотелось бы акцентировать внимание читателя, связана со спецификой течения раневого процесса при электроожогах. Отличительной особенностью поражения тканей электрическим током является потеря чувствительности неповрежденной кожи вблизи ожога, что обусловлено повреждением нервных волокон и кожных рецепторов. Нередко вследствие кровоизлияний, морфологических изменений в нервных волокнах развиваются невриты. Обширные поражения сосудов приводят к непрогнозируемым вторичным кровотечениям, иногда смертельным. Хотя течение электроожогов подчиняется закономерностям, характерным для термических ожогов, а воспалительная реакция и нагноения наступают примерно в те же сроки, но отторжение омертвевших тканей продолжается дольше, чем при термических поражениях, что связано с большей глубиной ожога. Более или менее существенное поражение нервной системы, всегда сопутствующее электротравме (о чем было сказано

выше), обуславливает особенности общей реакции организма на электротравму. Следует помнить, что у пострадавшего через несколько часов или дней после электротравмы может наступить внезапная остановка сердца, поэтому он должен находиться в стационаре под постоянным кардиологическим контролем и наблюдением невропатолога, а персонал и аппаратура должны быть готовы к проведению немедленных реанимационных мероприятий. К сожалению, эти особенности, характерные для электротравм, не всегда учитываются даже в специализированных ожоговых клиниках. Примеры 13.2 и 13.7 наглядно демонстрируют, к каким тяжелым последствиям это приводит.

Одной из самых существенных проблем является выбор хирургической тактики лечения глубоких ожогов. Традиционной тактикой является консервативный метод, проводящийся в соответствии с естественными фазами раневого процесса и играющий роль подготовки к последующей операции (кожной пластике). Применяемые при этом препараты главным образом ускоряют очищение ран от некротических тканей и способствуют предупреждению инфекционных осложнений.

Консервативная тактика лечения глубоких ожогов, по существу, пассивна и противоречит основному принципу хирургии — как можно быстрее удалить омертвевшие ткани. Спонтанное отторжение ожогового струпа затягивается до 6 недель и более, лишь после этого хирург может готовить рану к пересадке кожи. Однако смерть может наступить раньше, чем станет возможным хирургическое вмешательство; поэтому логичным и рациональным является стремление превратить глубокий ожог в хирургически чистый дефект, готовый к пересадке, в наиболее короткие сроки.

Кардинальным решением этой проблемы является раннее хирургическое удаление некроза с немедленным замещением дефекта кожным трансплантатом. Теоретически такая тактика позволяет сократить время заживления глубоких ожогов до 10 дней [69]. Преимущества ее очевидны. Однако последние 10 лет вокруг метода раннего хирургического лечения ожогов не утихают споры. В чем же дело? Почему интерес специалистов к этому методу то увеличивается, то уменьшается?

По данным отечественных специалистов [52], оптимальные сроки для ранней некроэктомии — первые несколько суток после травмы. Около 80 % ранних хирургических вмешательств осуществляется в течение семи дней после ожога. Это объясняется тем, что в более поздние сроки в ожоговой ране развивается острый воспалительный процесс, нагноение, что резко уменьшает вероятность приживления трансплантатов.

Но именно в ранние сроки дифференциальная диагностика поверхностных и глубоких ожогов наиболее трудна. В основном риск выполнить необоснованную операцию либо неполностью иссечь некроз из-за диагностических ошибок удерживает хирургов от широкого внедрения этого перспективного метода. Несмотря на то что технически умело выполненная ранняя некрэктомия с одномоментной аутодермопластикой позволяет сократить длительность лечения в 2—2,5 раза, предупредить развитие инфекционных осложнений, избавить больного от многих страданий, связанных с длительным очищением ожоговых ран при консервативной тактике лечения, этот прогрессивный метод применяется не более чем у 20 % пострадавших с глубокими ожогами [52, 69].

Основная причина такого положения — трудность распознавания границ глубокого ожога в ранние сроки после травмы.

Таким образом, от проблем лечения глубоких ожогов мы переходим к проблеме диагностики.

13.4. Проблемы диагностики ожогов

Традиционные методы. До настоящего времени самым распространенным диагностическим приемом для оценки глубины ожогов остается клинический метод, базирующийся на данных анамнеза, осмотре ожоговой раны и использовании некоторых диагностических проб.

На первом этапе диагностики устанавливают причину и обстоятельства травмы, природу поражающего агента, его температуру, длительность воздействия, сроки и характер первой помощи пострадавшему. Определяют локализацию ожогов, пол и возраст пострадавшего, так как на участках с тонкой кожей (тыльные поверхности кистей и стоп, внутреннее и сгибательные поверхности конечностей, особенно у детей, женщин и лиц пожилого возраста) вероятность поражения кожи на всю глубину при прочих равных условиях больше, чем на участках с более толстым кожным покровом (волосистая часть головы, спины, ягодицы, ладонные и подошвенные поверхности).

Очень важен внимательный осмотр ожоговой раны. Симптомы, используемые для определения глубины поражения, целесообразно разделить на три группы: а) внешние признаки омертвения тканей; б) признаки нарушения кровообращения; в) состояние болевой чувствительности [52].

Субъективность такой диагностики, неоднозначность и неопределенность диагностических критериев очевидны, а число

ошибок в оценке глубины ожогов полностью определяется квалификацией медицинского персонала и может достигнуть 50 % и более, так как большинство врачей, исключая специалистов ожоговых центров, не имеют достаточного опыта диагностики. Обычно площадь глубокого ожога уточняется в процессе лечения на основании динамики раневого процесса, после демаркации некроза. Как правило, такое уточнение возможно в сроки, когда применять раннюю хирургическую обработку раны уже поздно. Поэтому все попытки использования дополнительных методов диагностики направлены, с одной стороны, на ее объективизацию, а с другой — на обеспечение дифференциальной диагностики поверхностных и глубоких ожогов в наиболее ранние сроки после травмы.

Некоторое распространение получило прижизненное окрашивание пораженных тканей красителями (например, дисульфановым синим), вводимыми внутривенно. После медленного введения 5 мл 10 %-ного раствора красителя наступает быстро нарастающее по интенсивности прокрашивание непораженных тканей и участков ожога I II степени. Через 12—15 мин наиболее ярко окрашиваются участки поверхностных ожогов и жидкость ожоговых пузырей. Участки поражения IIIa степени приобретают пестрый вид: островки красной и багровой кожи чередуются с синими и голубыми участками. На участках глубоких ожогов цвет кожи первоначально не меняется. Лишь спустя 40 ч погибшие ткани окрашиваются в синий цвет, а окраска ожогов II степени и здоровой кожи исчезает. Таким образом, прижизненное окрашивание тканей позволяет визуально определить глубину и распространенность омертвения тканей в ранние сроки, что, несомненно, полезно для определения показаний к некроэктомии. Однако длительность прокрашивания здоровой кожи затрудняет наблюдение за состоянием пациента во время операции, что является большим недостатком этой методики [52].

Ряд методов основан на объективной оценке состояния кровообращения в ожоговой ране. С этой целью внутривенно вводят раствор флюоресцина, а затем облучают поверхность ожога в темном помещении кварцевой лампой. При этом здоровая кожа и участки ожога II степени светятся, а участки глубокого ожога, где кровообращение нарушено, остаются темными. Однако методики с внутривенным введением индикатора не получили сколько-нибудь широкого распространения в клиниках из-за своего неудобства, большой трудоемкости и слишком продолжительного времени, необходимого для обследования ожога.

Специалисты-комбустиологи единодушно констатируют (например, [52, 69]), что ни один из традиционных методов не позволяет в ранние сроки достоверно диагностировать глубину ожога. При этом подчеркивается, что изыскание такого метода является одной из наиболее актуальных проблем хирургии ожогов.

Нетрадиционные методы. К этой группе мы отнесем приборные методы, которые начали развиваться сравнительно недавно. Здесь следует упомянуть попытки ранней диагностики ожогов методами ядерного магнитного резонанса, электромагнитного зондирования в СВЧ-диапазоне длин волн, ультразвукового зондирования, термометрии поверхности ожоговой раны. Однако ни один из методов не вышел за рамки эксперимента либо по причине сложности аппаратуры, не позволяющей создать малогабаритные устройства для экспресс-диагностики, либо из-за невысокой диагностической достоверности.

Пожалуй, только тепловидение получило заметное распространение в ожоговых центрах, правда, не в повседневной диагностической практике, а преимущественно при проведении научных исследований. Остановимся на этой методике несколько подробнее.

В настоящее время тепловидение представляет собой одно из наиболее развивающихся направлений диагностического медицинского приборостроения. Тепловизионные обследования с большим или меньшим успехом применяются в различных областях травматологии, в частности при диагностике ожогов и переломов, при оценке состояния биологических тканей в области хирургических ран и т. д.

По принципу действия тепловизор представляет собой радиометр, работающий в средней инфракрасной (ИК) области спектра электромагнитных волн, как правило, в спектральных диапазонах 3—5 или 8—12 мкм. Выходной сигнал тепловизионного приемника пропорционален мощности потока ИК-излучения, падающего на его поверхность, следовательно, пропорционален интегральной плотности теплового излучения объекта в диапазоне спектральной чувствительности приемника. В качестве измерительных преобразователей в тепловизорах используются полупроводниковые фотоприемники, охлаждаемые до температуры жидкого азота с целью уменьшения уровня собственных шумов. Современные тепловизоры обладают узким мгновенным углом зрения, поэтому для получения термограмм протяженных объектов применяются оптико-механические сканирующие системы.

В медицинской практике тепловизоры применяются для

визуализации теплового поля человека, которое содержит обширную информацию об интенсивности обменных процессов и состоянии систем регулирования организма. Многочисленными исследованиями установлено, что тело человека независимо от цвета кожи излучает тепло в спектральном диапазоне 3—20 мкм с максимумом на длине волны 9 мкм, а по излучательной способности кожа практически идентична абсолютно черному телу, нагретому до той же температуры. В тепловизорах медицинского назначения обычно используется спектральный диапазон 8—12 мкм, поскольку на него приходится около четверти суммарного потока излучения тела человека, в то время как на диапазон 3—5 мкм — не более 1,5 % этого потока.

Первое применение термографии в комбустиологии было связано с оценкой глубины некроза при ожоговой травме. Последующие экспериментальные исследования показали, что при поверхностных ожогах на термограмме появляются светлые участки, а при глубоких — темные зоны.

Однако аномалии температурного поля кожи человека являются лишь косвенным свидетельством патологии, а их параметры определяются соотношением между теплоотдачей с поверхности кожи в окружающую среду и потоком метаболического тепла к поверхности тела. В связи с этим конфигурация, контрастность и яркость тепловизионного изображения температурной аномалии зависят от параметров окружающей среды и условий теплообмена между телом и средой, от степени влияния патологии на структуру теплоизолирующего слоя тела, от интенсивности кровотока в нем, мощности внутренних источников тепла и их пространственного распределения, состояния центральных и периферических отделов нервной системы и т. д.

Сложность расшифровки термографического изображения требует применения для этих целей ЭВМ. Информация с выхода тепловизора после обработки в аналого-цифровом преобразователе поступает в ЭВМ, где сравнивается с усредненными данными теплового портрета здорового человека. На основании этого анализа ЭВМ ставит предварительный диагноз. Интерпретация термографических данных является основной задачей современного этапа развития медицинской термографии.

Результаты исследования диагностических возможностей ЭВМ-термографии при определении степени повреждения тканей в области термической травмы на группе из 115 больных с ожогами II, IIIa, IIIб и IV степеней приведены в работе Т. В. Гогодзе. Результаты ЭВМ-термографии, которые сопо-

ставлялись с данными визуального наблюдения за ожоговой раной в динамике, а также с результатами диагностических проб, оказались достаточно информативными при диагностике степени повреждения тканей при термической травме. Кроме того, эти данные объективно отражали динамику развития и заживления поверхностных и глубоких ожоговых ран.

В условиях Киевского ожогового центра исследованы термограммы 23 больных с ожогами II, IIIa, IIIb и IV степеней. Исследование проводилось с помощью тепловизионной системы «РЭНК» и показало, что на данном этапе трудно предложить теетовую оценку глубины ожогов по температурному распределению на их поверхности, однако тенденция такой зависимости четко прослеживается и информативность метода для диагностики степени ожога несомненна.

Этому выводу противоречат результаты исследований М. Г. Григорьева с соавторами, которые полагают, что метод тепловидения не имеет перспективы для ранней диагностики глубины поражения тканей при ожогах.

В целом тепловизионному методу свойствен ряд недостатков, не позволяющих использовать его в настоящее время для экспресс-диагностики, а именно необходимость охлаждения приемника излучения до температур 60—80 К; достаточно высокая стоимость аппаратуры и ее техническая сложность; необходимость специальных условий эксплуатации тепловизионных устройств и специальной квалификации обслуживающего персонала; зависимость достоверности диагностики от опыта врача-диагноста и т. д.

Перспективы. В конце 70-х годов группа сотрудников Ленинградского института авиационного приборостроения под руководством проф. В. Е. Манойлова занималась созданием приборного метода диагностики глубины ожогов. В процессе этих поисков исследовались эффекты отражения кожей микроволновых электромагнитных сигналов в достаточно широкой области спектра — от СВЧ-радиоволн до оптического диапазона включительно. Оказалось, что коэффициент диффузного отражения кожи человека, измеренный в ближней инфракрасной области спектра, несет богатую информацию о состоянии кожи, ее структуре и целостности, степени ее кровенаполнения, а также косвенно отражает общее функциональное состояние организма и интенсивность его обменных процессов.

Также было установлено, что и при диагностике глубины ожогов наибольшей информативностью обладает ближняя ИК-область спектра. Коэффициент отражения кожи, измеренный в этой спектральной области, закономерно уменьшал-

ся при увеличении глубины поражения. Эти результаты послужили основой для разработки приборного метода ранней дифференциальной диагностики поверхностных и глубоких ожогов, названного коллективом авторов методом *инфракрасного зондирования*. Разработка была выполнена совместно со специалистами Ленинградского научно-исследовательского детского ортопедического института (ЛНИДОИ) имени Г. И. Турнера. Высокая информативность метода и простота его приборной реализации делают инфракрасное зондирование, по мнению автора, наиболее перспективным приборным методом ранней диагностики ожогов. Описанию этого метода и реализующих его устройств, анализу результатов клинических исследований и перспектив развития метода посвящен последний параграф настоящей главы.

13.5. Метод инфракрасного зондирования в диагностике ожогов

Сущность метода. Инфракрасное зондирование представляет собой одну из разновидностей отражательной спектрофотометрии. Сущность метода заключается в следующем. Исследуемый участок кожи облучают световым пучком ближней ИК-области спектра. Эти ИК-лучи проникают в ткань и диффузно рассеиваются в ней во всех направлениях. Часть рассеянного потока выходит из кожи в сторону излучателя и попадает на фотоприемник. Либо излучатель, либо фотоприемник установлен непосредственно на поверхности кожи, поэтому составляющая поверхностного отражения отсутствует. Регистрируемый фотоприемником сигнал пропорционален коэффициенту диффузного отражения толщи кожи. Поскольку в ближней ИК-области лежит окно прозрачности биотканей, глубина проникновения зондирующего луча составляет 3—8 мм (в зависимости от вида зондируемой ткани). Таким образом, с точки зрения физики значение сигнала, зарегистрированного фотоприемником, пропорционально коэффициенту диффузного отражения кожи, который, в свою очередь, зависит от ее структуры, толщины, насыщенности капиллярами и их состояния, пигментации и ряда других факторов.

Коэффициент диффузного отражения здоровой кожи варьируется в достаточно широких пределах в зависимости от локализации точки зондирования и состояния организма, а также от индивидуума к индивидууму. Вот почему в качестве диагностического критерия принято отношение сигналов, отраженных пораженным и симметричным непораженным

участками кожи. Если симметричного непораженного участка нет, выбирается ближайший к ожогу непораженный участок без видимых признаков отека. Таким образом, значение диагностического критерия представляет собой отношение коэффициентов диффузного отражения пораженной и непораженной кожи, измеренное в ближней ИК-области спектра [7].

В отличие от тепловидения метод ИК-зондирования является активным и предполагает наличие согласованных по спектральным характеристикам источника и приемника излучения, причем, как указывалось выше, для исключения зеркальной (поверхностной) составляющей отражения, по крайней мере, один из элементов этой оптоэлектронной пары устанавливается непосредственно на поверхности кожи.

Датчики. Возможные варианты расположения элементов оптоэлектронной пары в датчике прибора для ИК-зондирования показаны на рис. 13.2. На рис. 13.3 представлены примеры конструктивного исполнения датчиков для ИК-зондирования. В датчике 2 взаимное расположение излучателя и фотоприемника соответствует рис. 13.2, а, в датчиках 1 и 3 — рис. 13.2, б. В датчике 4 применены светодиод и фотодиод в бескорпусном исполнении, которые объединены в специальную гибридную интегральную схему, закрепленную на хирургическом пинцете (схема их взаимного расположения соответствует рис. 13.2, а).

Базовая схема. На основе метода ИК-зондирования разработано несколько модификаций индикатора степени термического ожога кожи (ИСТОК). Несмотря на некоторые раз-

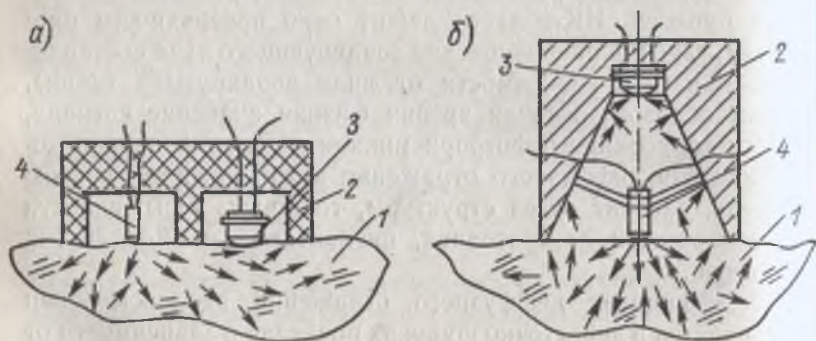


Рис. 13.2. Возможные варианты расположения элементов оптоэлектронной пары в корпусе датчика прибора при ИК-зондировании
1 — кожа; 2 — корпус датчика; 3 — фотоприемник; 4 — источник ИК-излучения

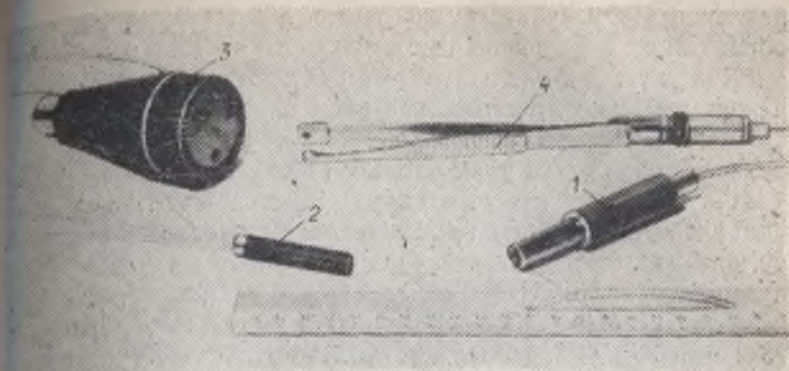


Рис. 13.3. Варианты конструктивного исполнения датчиков для ИК-зондирования

личия в конструкции их датчиков, различия схмотехнического решения и конструктивного исполнения измерительного тракта, все эти приборы выполнены на основе единой базовой функциональной схемы (рис. 13.4), содержащей первичный измерительный преобразователь, в состав которого входят согласованные по спектральным характеристикам ИК-излучатель (светодиод) и фотоприемник (фотодиод), канал уп-

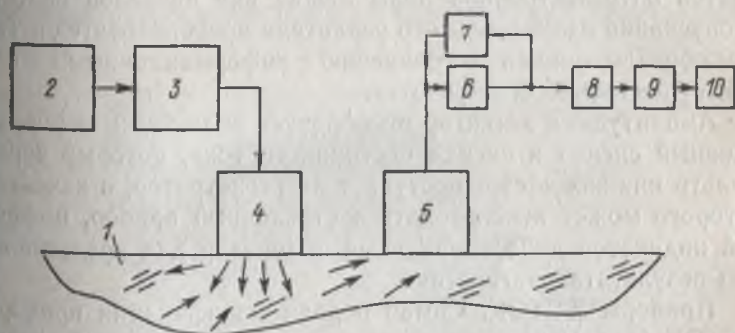


Рис. 13.4. Базовая функциональная схема приборов для ИК-зондирования биообъектов

1 — кожа; 2 — генератор прямоугольных импульсов; 3 — ключ; 4 — ИК-излучатель; 5 — фотоприемник; 6 — усилитель-преобразователь; 7 — частотно-избирательная обратная связь; 8 — амплитудный детектор; 9 — фильтр нижних частот; 10 — регистратор. Совокупность 2 и 3 — канал управления ИК-излучателем; 6, 7, 8, 9, 10 — тракт измерения, преобразования и регистрации отраженного светового потока

равления ИК-излучателем, а также тракт измерения, преобразования и регистрации отраженного светового потока.

Канал управления излучателем обеспечивает импульсный режим работы светодиода, при этом автоколебательный задающий генератор вырабатывает последовательность импульсов напряжения прямоугольной формы с частотой около 4 МГц. На время каждого импульса замыкается управляющий электронный ключ, подключающий светодиод к источнику питания, и через светодиод протекают импульсы тока с амплитудой в несколько десятков миллиампер, частота и длительность которых определяются импульсами задающего генератора. Светодиод на каждый импульс тока генерирует зондирующий импульс инфракрасного светового потока с длиной волны около 1 мкм.

Зондирующие ИК-импульсы распространяются в толще исследуемой биоткани, и их диффузно отраженная составляющая воспринимается кремниевым фотодиодом, вырабатывающим последовательность импульсов фототока с частотой задающего генератора и амплитудой, пропорциональной коэффициенту диффузного отражения биоткани. Импульсы фототока преобразуются в импульсы напряжения усилителем-преобразователем, охваченным частотно-избирательной обратной связью. Этот преобразователь усиливает только сигналы с частотой задающего генератора. Такой режим работы позволяет значительно повысить помехоустойчивость устройства, так как частотный спектр фоновых засветок датчика, сетевых помех, а также температурного дрейфа элементов оптоэлектронной пары лежит вне пределов полосы пропускания избирательного усилителя-преобразователя. Таким образом, помехи по сравнению с информационным сигналом существенно ослабляются.

Амплитудный детектор преобразует усиленный информационный сигнал в сигнал постоянного тока, который через фильтр нижних частот поступает на регистратор, в качестве которого может использоваться стрелочный прибор, цифровой индикатор либо символьный индикатор для представления результата диагностики.

Приборы ИСТОК. Самая первая модификация прибора ИСТОК (рис. 13.5) отличается жесткой конструкцией датчика, не обеспечивающей его нормированное давление на поверхность кожи. Шкала индикатора не оцифрована, а разбита на два сектора, обозначающих поверхностный и глубокий ожоги.

Исследовательский макет прибора ИСТОК (рис. 13.6) снабжен датчиком «плавающей» конструкции, обеспечиваю-

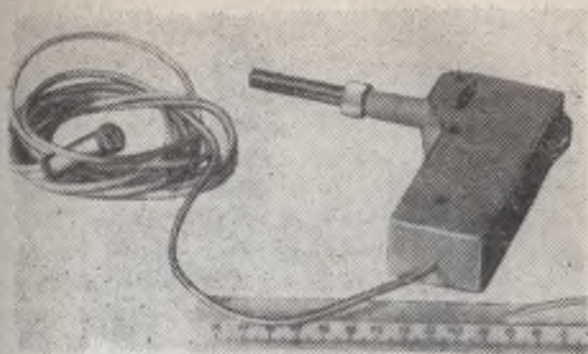


Рис. 13.5. Портативный ИК-индикатор глубины ожога кожи

шей нормированное значение его давления на поверхность кожи в процессе измерений. Шкала индикатора оцифрована. Эта модификация прибора использовалась при проведении медицинских испытаний с целью определения порога разграничения классов поверхностных и глубоких ожогов по значению коэффициента диффузного отражения.

Опытный образец прибора ИСТОК (рис. 13.7) выполнен в НИИ «Электронстандарт» в результате совместной с ЛИАП опытно-конструкторской работы. Эта модификация прибора отличается от предыдущих полуавтоматическим режимом работы.

На рис. 13.8 представлена одна из последних модификаций индикатора, отличающаяся наличием двух табло: цифро-

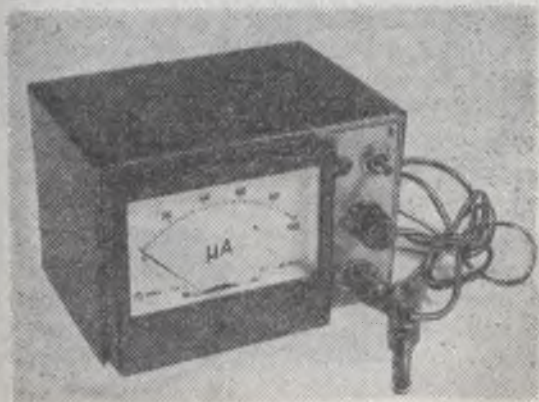


Рис. 13.6 Исследовательский макет устройства для диагностики глубины ожогов методом ИК-зондирования

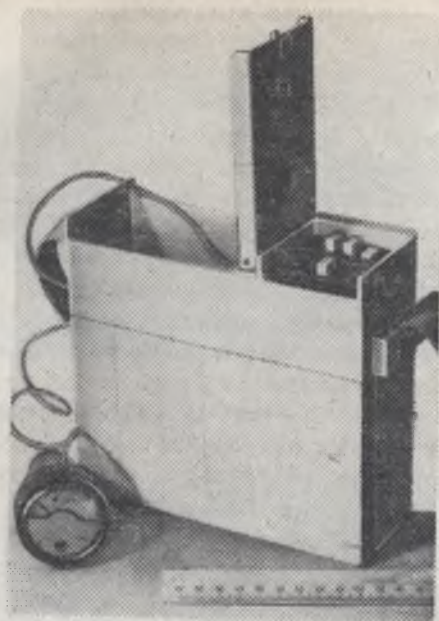


Рис. 13.7. Опытный образец прибора для диагностики ожогов, разработанный совместно специалистами ЛИАП и ВНИИ «Электронстандарт»

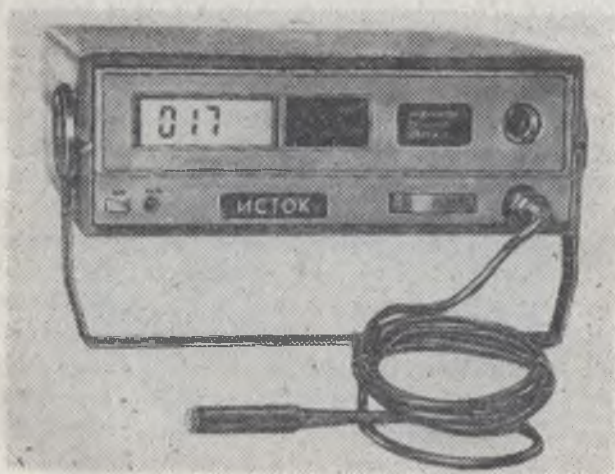


Рис. 13.8. Прибор ИСТОК с цифровым и символьным представлением диагностической информации

вого (для отображения значения диагностического критерия) и символьного (для отображения диагноза), а также наличием логической схемы анализа значения диагностического критерия и формирования символа диагноза.

Метрология. Одной из важнейших проблем при исследовании и приборной реализации метода ИК-зондирования была разработка принципов его метрологической аттестации. Сложность задачи заключалась в том, что устройства ИСТОК совмещают функции измерительного медицинского прибора и устройства диагностики. В результате была принята двухэтапная схема метрологической аттестации приборов ИСТОК. На первом этапе они аттестовались в качестве измерителей отношения коэффициентов диффузного отражения по стандартным образцам молочных стекол, изготовленных и аттестованных по коэффициенту отражения в Государственном оптическом институте. По результатам этих испытаний установлено, что погрешность индикаторов при определении отношения коэффициентов отражения не превышает 5 %.

На втором этапе аттестации по результатам клинических испытаний определялась достоверность диагностики глубины ожогов приборами ИСТОК. С этой целью по обучающей выборке экспериментальных данных, содержащей результаты 225 измерений коэффициентов отражения на ожоговых ранах II, IIIa и IIIб степеней, выполненных в первые четверо суток с момента травмы у 107 больных, были исследованы алгоритмы диагностики и определены пороговые значения диагностических критериев для классов поверхностных и глубоких ожогов.

Диагностические критерии и оценка достоверности метода. В процессе испытаний у каждого больного регистрировался следующий набор параметров: $x_1 = x'_1/x''_1$ — приборный диагностический критерий (отношение амплитуд ИК-сигналов x'_1 и x''_1 , отраженных ожоговой раной и непораженным участком кожи соответственно); x_2 — степень ожога в соответствии с заключительным клиническим диагнозом; x_3 — время в сутках, прошедшее с момента поражения; x_4 и x_5 — пол и возраст пациента соответственно; x_6 — поражающий фактор; x_7 — локализация ожога.

С целью выявления возможности постановки правильного диагноза по формальным переменным $x_1, x_3, \dots, x_7$ обучающая выборка экспериментальных данных была подвергнута статистической обработке методами регрессионного и дискриминантного анализа.

На первом этапе обработки методом пошаговой регрессии определен оптимальный для предсказания диагноза набор

параметров из совокупности $x_1, x_3, \dots, x_7$. На втором этапе методом дискриминантного анализа построено решающее правило для определения диагноза по найденному набору переменных с наименьшей ошибкой и определены границы между классами ожогов различной степени. Программы обработки на языке ФОРТРАН реализованы на ЭВМ ЕС-1022.

Регрессионный анализ обучающей выборки экспериментальных данных показал, что величина статистики Фишера, которая является функционалом качества регрессии, максимальна для переменной x_1 , а далее в порядке убывания значимости следуют x_6, x_7, x_3, x_4, x_5 . Величина статистики Фишера изменяется от значения $F=50,45$ для одной переменной x_1 до значения $F=16,9$ для комбинации, содержащей все переменные. Очевидно, что наибольшей информативностью обладает набор из всех шести переменных. Однако в этом случае алгоритм обработки диагностической информации и его схемотехническая реализация в экспресс-диагностическом устройстве существенно усложняются. С учетом того что добавление к x_1 других пяти переменных ($x_3, \dots, x_7$) несущественно увеличивает множественный коэффициент корреляции (от 0,74 до 0,79), целесообразно врачебный диагноз определять только по приборному диагностическому параметру x_1 .

Дискриминантный анализ обучающей выборки выполнен для двух случаев: дифференциальной диагностики поверхностных и глубоких ожогов и идентификации ожогов в соответствии с общепринятой в СССР классификацией.

Для каждого случая анализа получены дискриминантные функции, определены оптимальные границы между классами ожогов (поверхностные и глубокие) и погрешности идентификации.

В случае учета пяти степеней ожогов оптимальными границами между классами по шкале прибора являются следующие значения x_1

$x_1=0,956$: здоровая кожа — I, II степень,

$x_1=0,819$: I, II—IIIa степень,

$x_1=0,73$: IIIa—IIIб степень;

$x_1=0,327$ IIIб. IV степень.

Средний процент ошибок попадания в смежный класс не превышает 34 % при полном исключении более грубых ошибок.

При дифференциальной диагностике поверхностных и глубоких ожогов, т. е. в наиболее важном для практического применения случае, погрешность постановки правильного диагноза не превышала 15 % (граница раздела классов ожо-

поверхностный — глубокий установлена при значении $x_1 = 0,75$).

Анализ диагностических ошибок показал, что одной из наиболее существенных является ошибка идентификации глубоких ожогов, покрытых плотным струпом белого цвета. В этом случае коэффициенты отражения ожоговой раны и неповрежденной кожи практически равны. Для устранения таких ошибок введен дополнительный приборный диагностический параметр $\hat{x}_1$, равный разности параметров x_1 , измеренных при различных давлениях измерительного зонда на поверхность кожи.

Для определения параметра $\hat{x}_1$ измеряют $x_1(p_1)$ при давлении p датчика на поверхность ожога $p_1 \leq 0,002$ МПа и $x_1(p_2)$ при давлении $p_2 \geq 0,01$ МПа. Экспериментальные исследования показали, что значение $\hat{x}_1$ для неповрежденной кожи и поверхностных ожогов лежит в диапазоне $0,03 \leq \hat{x}_1 \leq 0,20$, в то время как для глубоких ожогов, покрытых белым струпом, значение $\hat{x}_1$ практически равно нулю ($\hat{x}_1 \leq 0,01$). Это обусловлено тем, что увеличение давления датчика на поверхность жизнеспособной кожи уменьшает ее кровенаполнение, что, в свою очередь, приводит к изменению ее коэффициента отражения. Белый струп представляет собой некротическую ткань, практически обескровленную, поэтому его коэффициент отражения не зависит от давления датчика на его поверхность.

Результирующий алгоритм диагностической процедуры приведен на рис. 13.9. Из алгоритма видно, что при $x_1 \leq 0,75$, а также при $x_1 > 0,95$, но $\hat{x}_1 < 0,02$ диагностируется глубокий ожог. При x_1 в интервале $0,75 < x_1 \leq 0,95$, а также при $x_1 > 0,95$, но $\hat{x}_1 > 0,02$ диагностируется поверхностный ожог. Экспериментальное исследование 34 глубоких ожогов, покрытых струпом белого цвета, показало, что введение дополнительного приборного критерия $\hat{x}_1$ позволяет надежно отличать их по формальным признакам от поверхностных ожогов и здоровой кожи, т. е. уменьшить число диагностических ошибок.

Медицинские испытания, выполненные на контрольных группах больных, не подвергавшихся предварительному отбору, были проведены в ЛНИДОИ имени Г. И. Турнера и Московском городском научно-исследовательском институте скорой помощи имени Н. В. Склифосовского. Результаты этих испытаний показали, что приборный диагноз, поставленный с помощью устройства ИСТОК в первые трое суток после травмы, достоверен в 85—95 % случаев. В этих же условиях достоверность врачебного диагноза (в процентах), постав-

параметров из совокупности $x_1, x_3, \dots, x_7$. На втором этапе методом дискриминантного анализа построено решающее правило для определения диагноза по найденному набору переменных с наименьшей ошибкой и определены границы между классами ожогов различной степени. Программы обработки на языке ФОРТРАН реализованы на ЭВМ ЕС-1022.

Регрессионный анализ обучающей выборки экспериментальных данных показал, что величина статистики Фишера, которая является функционалом качества регрессии, максимальна для переменной x_1 , а далее в порядке убывания значимости следуют x_6, x_7, x_3, x_4, x_5 . Величина статистики Фишера изменяется от значения $F=50,45$ для одной переменной x_1 до значения $F=16,9$ для комбинации, содержащей все переменные. Очевидно, что наибольшей информативностью обладает набор из всех шести переменных. Однако в этом случае алгоритм обработки диагностической информации и его схемотехническая реализация в экспресс-диагностическом устройстве существенно усложняются. С учетом того что добавление к x_1 других пяти переменных ($x_3, \dots, x_7$) несущественно увеличивает множественный коэффициент корреляции (от 0,74 до 0,79), целесообразно врачебный диагноз определять только по приборному диагностическому параметру x_1 .

Дискриминантный анализ обучающей выборки выполнен для двух случаев: дифференциальной диагностики поверхностных и глубоких ожогов и идентификации ожогов в соответствии с общепринятой в СССР классификацией.

Для каждого случая анализа получены дискриминантные функции, определены оптимальные границы между классами ожогов (поверхностные и глубокие) и погрешности идентификации.

В случае учета пяти степеней ожогов оптимальными границами между классами по шкале прибора являются следующие значения x_1

$x_1=0,956$: здоровая кожа — I, II степень,

$x_1=0,819$: I, II—IIIa степень,

$x_1=0,73$: IIIa—IIIб степень;

$x_1=0,327$ IIIб . IV степень.

Средний процент ошибок попадания в смежный класс не превышает 34 % при полном исключении более грубых ошибок.

При дифференциальной диагностике поверхностных и глубоких ожогов, т. е. в наиболее важном для практического применения случае, погрешность постановки правильного диагноза не превышала 15 % (граница раздела классов ожо-

гов поверхностный — глубокий установлена при значении $x_1 = 0,75$).

Анализ диагностических ошибок показал, что одной из наиболее существенных является ошибка идентификации глубоких ожогов, покрытых плотным струпом белого цвета. В этом случае коэффициенты отражения ожоговой раны и непораженной кожи практически равны. Для устранения таких ошибок введен дополнительный приборный диагностический параметр $\hat{x}_1$, равный разности параметров x_1 , измеренных при различных давлениях измерительного зонда на поверхность кожи.

Для определения параметра $\hat{x}_1$ измеряют $x_1(p_1)$ при давлении p датчика на поверхность ожога $p_1 \leq 0,002$ МПа и $x_1(p_2)$ при давлении $p_2 \geq 0,01$ МПа. Экспериментальные исследования показали, что значение $\hat{x}_1$ для непораженной кожи и поверхностных ожогов лежит в диапазоне $0,03 \leq \hat{x}_1 \leq 0,20$, в то время как для глубоких ожогов, покрытых белым струпом, значение $\hat{x}_1$ практически равно нулю ($\hat{x}_1 \leq 0,01$). Это обусловлено тем, что увеличение давления датчика на поверхность жизнеспособной кожи уменьшает ее кровенаполнение, что, в свою очередь, приводит к изменению ее коэффициента отражения. Белый струп представляет собой некротическую ткань, практически обескровленную, поэтому его коэффициент отражения не зависит от давления датчика на его поверхность.

Результирующий алгоритм диагностической процедуры приведен на рис. 13.9. Из алгоритма видно, что при $x_1 \leq 0,75$, а также при $x_1 > 0,95$, но $\hat{x}_1 < 0,02$ диагностируется глубокий ожог. При x_1 в интервале $0,75 < x_1 \leq 0,95$, а также при $x_1 > 0,95$, но $\hat{x}_1 > 0,02$ диагностируется поверхностный ожог. Экспериментальное исследование 34 глубоких ожогов, покрытых струпом белого цвета, показало, что введение дополнительного приборного критерия $\hat{x}_1$ позволяет надежно отличать их по формальным признакам от поверхностных ожогов и здоровой кожи, т. е. уменьшить число диагностических ошибок.

Медицинские испытания, выполненные на контрольных группах больных, не подвергавшихся предварительному отбору, были проведены в ЛНИДОИ имени Г. И. Турнера и Московском городском научно-исследовательском институте скорой помощи имени Н. В. Склифосовского. Результаты этих испытаний показали, что приборный диагноз, поставленный с помощью устройства ИСТОК в первые трое суток после травмы, достоверен в 85—95 % случаев. В этих же условиях достоверность врачебного диагноза (в процентах), постав-

ленного по клиническим признакам ожогового поражения, составила:

Врачи, не имеющие специального хирургического образования (например, врач «Скорой помощи»)	50—70
Хирурги широкого профиля	65—75
Специалисты ожоговых отделений	70—85

Наиболее наглядную и адекватную оценку достоверности метода ИК-зондирования дает распределение вероятности ошибки по шкале диагностического критерия, представленное гистограммой на рис. 13.10. Гистограмма построена по результатам статистической обработки всего массива экспериментальных данных (обучающая и контрольная выборка). На этой же гистограмме для сравнения показаны вероятности ошибок «диагноза направления» (врач «Скорой помощи»), «диагноза поступления» (хирург приемного покоя хирургического отделения) и предварительного клинического диагноза

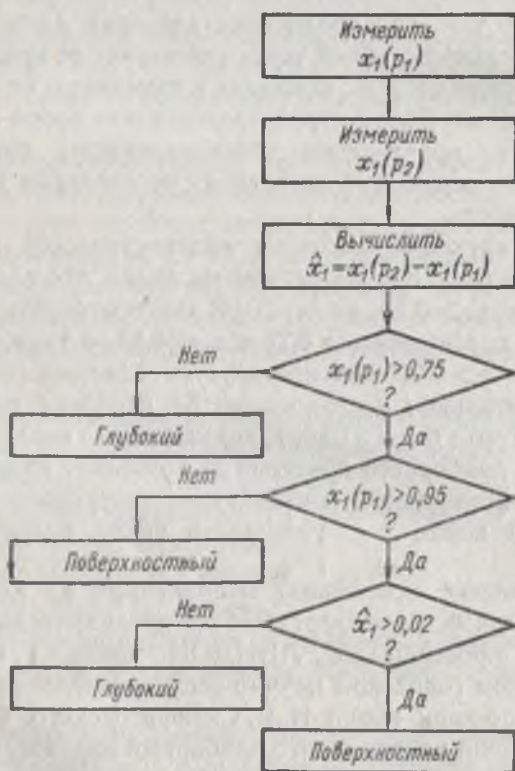


Рис. 13.9. Алгоритм диагностики глубины ожогов методом ИК-зондирования

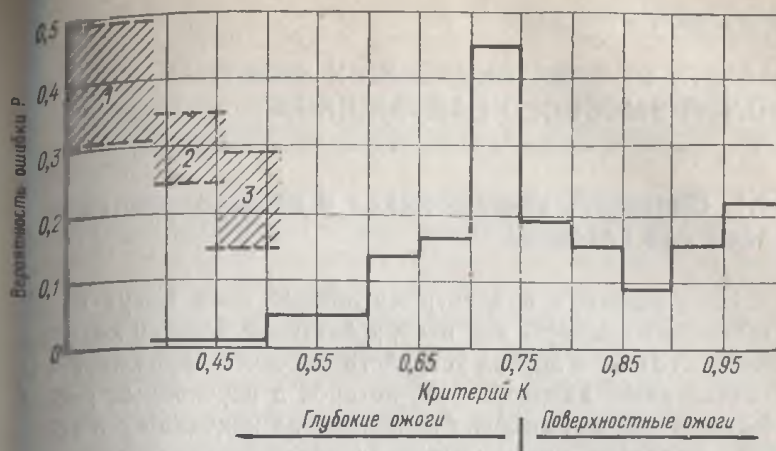


Рис. 13.10. Гистограмма распределения вероятности диагностической ошибки по шкале прибора ИСТОК

Вероятность диагностической ошибки врача «Скорой помощи» (1), хирурга общего профиля (2), специалиста-кислородолога (3)

(врач — специалист ожогового отделения), полученные на основании анализа истории болезни пациентов, прошедших обследование методом ИК-зондирования. Анализ распределения вероятности ошибки приборного диагноза показывает, что только узкая зона вблизи границы раздела классов поверхностных и глубоких ожогов $0,70 \leq x_1 \leq 0,75$ (где x_1 — приборный диагностический критерий) является зоной недоуверенной диагностики. Для остальной части шкалы прибора ИСТОК вероятность диагностической ошибки ниже уровня вероятности ошибки для специалиста высокой квалификации.

Выводы. Использование метода ИК-зондирования для экспресс-диагностики ожогов в раннем посттравматическом периоде позволяет свести к минимуму субъективизм оценки глубины поражения, повысив тем самым достоверность диагностики на 10—20 %. Метод безвреден для пациентов, а реализующий его диагностический прибор ИСТОК портативен, прост и удобен в эксплуатации, не требует специальной квалификации медперсонала, что позволяет применять его на всех этапах оказания медицинской помощи обожженным. Использование прибора ИСТОК в специализированной ожоговой клинике позволяет в первые дни и даже часы после травмы адекватно оценить глубину ожогов, своевременно принять решение о раннем хирургическом лечении в случае глубоких ожогов и тем самым значительно сократить сроки лечения, улучшить его функциональные результаты.

ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

14.1. Опасность электрических и электромагнитных полей для человека

Электрические и электромагнитные поля могут воздействовать на человека как непосредственно, если он находится вблизи ЛЭП или других устройств высокого напряжения, так и наведенным напряжением, которое в переходных рабочих режимах или при авариях возникает на находящихся вблизи ЛЭП проводах связи, проводах сетей напряжением ниже 1000 В и на некоторых металлических предметах, не связанных с землей.

О том, что электрические и электромагнитные поля вредно воздействуют на человека, известно уже давно (см. § 9.7). Многочисленные исследования, проведенные в СССР и за рубежом, выявили ряд факторов, обуславливающих исход этого воздействия; к их числу относятся частота поля, если речь идет об электромагнитном поле; напряженность поля, если речь идет о любом поле; состояние человека и т. д. [17].

О профессиональной вредности поля промышленной частоты существовали противоречивые суждения, нами здесь не рассматриваемые, поскольку профвредность высоких частот представляет собой особую тему, выходящую за рамки данной книги. Сооружение ЛЭП напряжением выше 200 кВ потребовало изучения механизма действия полей и разработки соответствующих защитных мероприятий; ранее, до появления ЛЭП столь высоких напряжений, проблема профвредности носила частный характер.

В настоящее время в Советском Союзе эксплуатируются ЛЭП напряжением 500 и 750 кВ и еще больших напряжений. Рассматривается возможность повышения напряжения. Расширяющееся применение электроустановок сверхвысоких напряжений приводит к значительному увеличению числа лиц, находящихся в процессе своей производственной деятельности в зоне ЛЭП сверхвысоких напряжений. Так, в 1980 г. число работающих в зоне напряжений 500 и 750 кВ превысило 15 тыс. человек, и оно будет расти. К тому же не решена еще и проблема защиты лиц, работающих в зоне ЛЭП напряжением 110 и 200 кВ. Наконец, возникла необходимость широкого проведения профилактических ремонтов оборудования без

его отключения, поскольку такой ремонт под напряжением обеспечивает возможность непрерывного обслуживания потребителей и повышает надежность электроснабжения. С исчерпывающей полнотой метод работ под высоким напряжением описан в докторской диссертации П. А. Долина и в ряде его статей.

Поэтому закономерно, что изучением профвредности электрических и электромагнитных полей и разработкой мер защиты от их действия занимаются в СССР во многих организациях. Исследования заключаются в медико-биологическом и биофизическом обследовании состояния лиц, работающих в зонах электрических полей высоких напряжений, в анализе их жалоб на неприятные ощущения, в изучении действия электрических и электромагнитных полей на животных, в инструментальном определении типового распределения напряженности электрического поля на рабочих местах при различных конфигурациях и режимах работы ЛЭП.

Следует подчеркнуть разительное отличие в подходах к таким исследованиям в разных странах. Если в США, как это видно из работ В. Ковенховена [101], цель исследования состоит в определении условий труда, при которых наступающая потеря трудоспособности персонала еще не подлежит оплате предпринимателем, то в СССР заняты объективным изучением действия полей, в том числе и такого, которое не связано с потерей трудоспособности.

Существенную помощь в оценке характера влияния электрического поля на человека оказали результаты проведенного М. И. Яковлевой многолетнего и весьма трудоемкого сравнительно-физиологического исследования действия электрического поля различной напряженности на многочисленные виды животных. Исследования М. И. Яковлевой (Физиологические механизмы действия электромагнитных полей. Л.: Медицина, 1973) достаточно убедительно подтверждают высказанную нами гипотезу о том, что в конечной стадии тяжесть исхода предопределяется нарушением мозгового кровообращения (см. § 6.4).

14.2. Нормирование безопасных значений напряженности поля

В опытах, проведенных многими исследователями, обнаружено четкое пороговое значение напряженности поля, при котором наступает разительное изменение реакции подопытного животного. Оно определено равным 160 кВ/м; меньшая

напряженность поля сколько-нибудь заметного вреда живому организму не наносит.

Аналогичный вывод делает В. Ковенховен, основываясь на результатах медицинского обследования персонала, работавшего в переменных электрических полях [101]. Наблюдения производились над одиннадцатью монтерами-линейщиками, работавшими под напряжением на открытой подстанции, имевшей две ЛЭП 345 кВ и шесть ЛЭП 138 кВ. В обязанности этих монтеров входили оперативные переключения, наладка аппаратуры и ремонт воздушной изоляции. Площадь подстанции составляла около 1000 м². Рассматривались условия работы, которая проводилась ремонтным персоналом в специальной, надежно изолированной люльке, подводившейся к рабочему месту. В люльке имелось приспособление, позволяющее осуществлять полную или частичную экранизацию. Максимальная напряженность поля на отдельных участках тела находилась в зависимости от степени экранирования в пределах 20 кВ/м и больше. Токи, проходившие через тело монтера, при разных режимах экранирования составляли 30—120 мкА, а при отсутствии экранирования — до 0,3—0,4 мА. Доказано, что в случае полного экранирования люльки токи, протекающие через тело работающего, имеют весьма малое значение. Снятие экранов с задней стенки и верха люльки приводит к значительному увеличению площади, находящейся под непосредственным воздействием поля. Ток через тело человека возрастает в 5—6 раз. Снятие только боковых экранов увеличивает ток в 2—2,5 раза, но при этом подвергаются воздействию наиболее уязвимые к действию поля части тела — область паха и мошонки. Измерения токов проводились по значению падения напряжения на сопротивлении, включенном в замыкающую тело человека петлю. Последовательно включенное в цепь человека сопротивление находилось в пределах 5—10 кОм. Подобным же образом измерялся ток и при прямом прикосновении человека, находящегося в изолированной люльке, к проводу под напряжением. Кривая тока представляла собой искаженную синусоиду. Искажение вызывалось нелинейностью электрического сопротивления тела человека.

Медицинский контроль и медицинское обследование проводились с интервалом около шести месяцев в течение 3,5 лет и сопровождалось биохимическими исследованиями крови и содержимого кишечника. В течение всего времени не было замечено каких-либо существенных изменений в эмоциональных характеристиках, в сердечно-сосудистой и дыхательной системах, а также в работе зрительных и слуховых анализаторов.

Некоторые отклонения от нормы обнаружили лишь урологи.

Из исследования сделан вывод — хорошее экранирование при работах на линиях электропередачи и подстанциях, находящихся под напряжением до 345 кВ, обеспечивает достаточную электробезопасность.

Безусловный интерес в рассматриваемом плане представляет комплексное исследование, проведенное во ВНИИ охраны труда ВЦСПС (г. Ленинград) Ю. А. Морозовым с сотрудниками в содружестве с кафедрой техники высоких напряжений Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина, руководимой членом-корреспондентом Академии наук СССР М. В. Костенко. Задавшись целью выявить функциональные изменения у лиц, работающих в электрическом поле, авторы сопоставили численные значения напряженности полей, в которых оказывались люди, с данными их медико-биологического обследования. Распределение напряженности поля в различных местах рабочей зоны открытых распределительных устройств (ОРУ) напряжением 500 кВ определялось экспериментально.

Измерения показали, что обслуживающий персонал ОРУ подвергался воздействию электрического поля, максимальная напряженность которого составляла 12—13 кВ/м, средняя 6—8 кВ/м, минимальная 2—4 кВ/м. При максимальной напряженности поля ток через тело человека достигал 180—230 мкА, при минимальной 30—40 мкА. В первом приближении эти цифры согласуются с данными В. Ковенховена.

Действие электрического поля большой напряженности может проявляться по-разному [76]. Находясь в поле, тело человека заряжается при любом соприкосновении с металлической конструкцией подстанции или корпусами аппаратов. В результате этого может возникнуть разрядный импульс. Время его составляет микросекунды. Разряд вызывает неприятное ощущение укола. Зафиксировано, что такой неожиданный укол подчас приводит к неспецифической травме — падению с высоты, ушибу рабочего, стоящего ниже, инструментом, выпавшим из руки рабочего, стоящего выше, и т. д. Укол может возникнуть даже при рукопожатии двух работающих в случае, если один из них находится в сухой обуви с изолирующей подошвой, а второй не имеет ее или в момент рукопожатия другая рука товарища касается металлической конструкции.

По мнению авторов исследования, работа на ЛЭП и подстанциях напряжением 110, 220 и 380 кВ безопасна, но разрядные импульсы могут вызвать болевое ощущение, нервный

проходящий шок и даже несложную по развитию судорогу. Как будет показано далее, исследования отечественных ученых доказывают и непосредственное специфическое действие поля на организм.

Обслуживающий ОРУ персонал может быть разделен на две группы — оперативные дежурные и наладчики-ремонтники. Дежурный персонал при оперативных осмотрах и переключениях может находиться в рабочих зонах с большой или малой напряженностью поля, но общее время пребывания его в условиях воздействия поля не превышает 2—2,5 ч, в то время как персонал, выполняющий наладочно-ремонтные работы, может находиться в условиях воздействия электрического поля практически в течение всей смены, а в аварийных случаях и более.

Т. Е. Сазонова в работе [62], предшествовавшей исследованию, приводит данные обследования 54 человек, в том числе 29 оперативных дежурных. Стаж работы в условиях воздействия поля: до 1 года — 12 человек, от 1 до 3 лет — 22, от 3 до 5 лет — 15, свыше 5 лет — 5 человек. Обследуемые состояли из лиц среднего возраста и, как видно из только что приведенных цифр, с небольшим стажем работы в условиях воздействия поля. Автором применялся комплексный метод исследования, позволяющий оценить функциональное состояние центральной и вегетативной нервной систем. Состояние центральной нервной системы оценивалось по латентному времени и числу ошибок простой и дифференцированной реакции, по критической частоте мелькания для глаза, по возбудимости и другим параметрам. Исследовались показатели состояния вегетативной нервной системы: температура тела, частота пульса, артериальное давление. Применялась функциональная проба по приседанию. Отклонение от нормы было обнаружено в большей степени у наладочно-ремонтной группы. К концу дня у них повышалась температура тела, артериальное давление оказывалось ниже нормы.

Обобщение показателей состояния центральной нервной системы показало следующее. У оперативных дежурных состояние нервно-мышечного аппарата рук в течение рабочего дня не менялось, а у наладочно-ремонтного персонала к концу рабочего дня по сравнению с началом снижалась функциональная подвижность и повышалась возбудимость центрального звена двигательного анализатора. Латентное время реакции и число ошибок у всех работающих увеличивались, но у второй группы больше, чем у первой. Изменение нейродинамики у второй группы проявлялось значительно, чем у первой. Таким образом, можно сделать вывод, что у дежурных

лишь в конце рабочего дня наблюдались слабо выраженные изменения высших отделов центральной нервной системы, в то время как у наладочно-ремонтного персонала в течение и после работы в электрическом поле отмечались стойкие функциональные изменения не только высших отделов центральной нервной системы, но и более низких ее звеньев и вегетативных функций. Была обнаружена и определенная направленность этих изменений.

Стаж работы в электрическом поле большинства обследуемых невелик (до 3 лет), поэтому выявленные функциональные изменения в организме необходимо рассматривать как начало неблагоприятного воздействия полей. Т. Е. Сазонова и ряд других отечественных исследователей, несомненно, установили то, что прошло незамеченным В. Ковенховен и его сотрудниками. Электрическое поле оказывает влияние на организм человека, и это влияние может привести к серьезным последствиям. К этому надо добавить, что при этих исследованиях не оценивалось воздействие поля при непосредственном соприкосновении человека с токоведущими частями, находящимися под напряжением. Напряженности поля настолько возрастают в условиях технического прогресса, что даже при хорошем экранировании не исключено пребывание в электрическом поле, опасном для человека.

При действии электромагнитного поля на человека на него могут оказать влияние электрические и магнитные составляющие поля непосредственно через акупунктурные точки. Однако на данной стадии изучения влиянием магнитной составляющей можно пренебречь. Напряженность электромагнитного поля в рабочих зонах ЛЭП и ОРУ 750 кВ на высоте человеческого роста примерно в 5—6 раз меньше опасных значений. Но это подлежит дальнейшему изучению.

Можно согласиться и с более поздними выводами Ю. А. Морозова и его сотрудников, касающимися нормирования санитарно-гигиенических условий при работе под напряжением. Эти выводы были сделаны на основе комплексных медико-физиологических обследований уже не нескольких десятков, как в работе Т. Е. Сазоновой, а нескольких сотен человек из числа персонала, эксплуатировавшего установки и ЛЭП напряжением 220, 380 и 500 кВ. Выявлено неблагоприятное воздействие электрического поля промышленной частоты на персонал ЛЭП и подстанций напряжением 500 кВ и выше; при напряжении 380 и 220 кВ это действие выражено слабо. Но при всех напряжениях действие поля зависит от продолжительности нахождения в нем. Это позволило обосновать

вать следующие нормативы для электрических полей промышленной частоты:

Напряженность поля, кВ/м	5	10	15	20	25
Допустимое время пребывания в электрическом поле на протяжении 8-часового рабочего дня	8 ч	3 ч	1,5 ч	10 мин	5 мин

Это означает, что если человек проработал, скажем, 10 мин в поле напряженностью 20 кВ/м, то остальные 7 ч 50 мин рабочего дня он должен находиться в поле напряженностью не выше 5 кВ/м.

Как видно из рекомендуемых значений, зависимость между напряженностью поля и допустимым временем пребывания в нем носит нелинейный характер.

Наблюдения, проведенные в установках высоких и сверхвысоких напряжений постоянного тока, показывают, что опасность для человека вызывает поток аэроионов уже при напряженности поля 50 кВ/м. Предлагается нормировать плотность тока аэроионов равной $5 \cdot 10^{-4}$ мкА/см², а допустимый ток, протекающий через тело человека, ограничить 1 мкА. И здесь имеется полная согласованность с нашей гипотезой о механизме действия электрического тока, ибо токи 1 мкА уже могут нарушить нормальную для жизнедеятельности человека электропроводимость центральной нервной системы, что доказывается и работами И. Е. Михальцева (Биофизика. 1982. № 8).

Исходя из отечественных и зарубежных исследований, следует считать установленным, что хотя воздействие электрических электромагнитных полей на эксплуатационный персонал в современных условиях возрастает, но устранить их опасное влияние техническими и организационными мерами вполне возможно. При этом, безусловно, потребуется значительное повышение культуры работы и дисциплинированности эксплуатационного персонала.

14.3. Защита персонала от воздействия электрических и электромагнитных полей

Конструктивные меры. Снижения напряженности поля в рабочих зонах можно добиться целенаправленным проектированием ОРУ, а в некоторых случаях и опор ЛЭП. При проектировании высоковольтных ЛЭП и ОРУ параметры вы-

бираются главным образом из расчета допустимых потерь мощности в линии и значения радиопомех, возникающих в результате появления короны. Получающиеся в рабочих зонах значения потенциалов и напряженности электрического поля, как правило, не учитываются. Обычно не измеряются они и во время приемки линий и подстанций в эксплуатацию. С. А. Лебедев и Ю. А. Морозов [24] доказали, что соответствующим выбором параметров (высота подвески провода над землей, сечение провода, шаг расщепления и т. д.) уже на стадии проектирования можно уменьшить потенциалы и напряженность электрического поля. Исходной величиной в этом случае является максимальная напряженность поля у поверхности провода, ограничиваемой короной. Амплитудное значение максимальной напряженности поля можно получить из выражений, предложенных этими авторами.

С учетом допустимого значения радиопомех наибольшее значение напряженности поля оказывается в пределах, не превышающих 26—28 кВ/см, в зависимости от конкретных условий при относительной плотности воздуха, равной единице.

Одним из практических способов уменьшения действия поля на персонал, обслуживающий ОРУ, является снижение напряженности поля с помощью заземленных тросов, которые подвешиваются в рабочей зоне под токоведущими проводами. При проектировании ОРУ необходимо аналитически оценить степень уменьшения потенциала защищаемой рабочей зоны в зависимости от геометрических параметров заземленных тросов, их сечения, высоты подвески, числа тросов и т. д. В работе [24] приведено аналитическое выражение, позволяющее производить сравнительную оценку различных вариантов подвески тросов. Наиболее существенное влияние на уменьшение потенциала в рабочей зоне оказывают высота подвески заземленных тросов и расстояние между ними. Сечение их практически можно выбрать из расчета механической прочности.

Применением заземленных тросов, подвешенных на высоте 2,5 м над землей под фазами соединительных шин ОРУ 750 кВ, удается уменьшить потенциал в рабочей зоне на высоте 1,8 м с 30 до 13 кВ. При такой напряженности поля опасное воздействие его минимально.

Устройство временных экранирующих приспособлений. Такие приспособления можно разделить на две группы. К первой следует отнести защитные приспособления, предназначенные для работ, проводимых непосредственно на территории подстанции. К таким работам относятся ревизия мас-

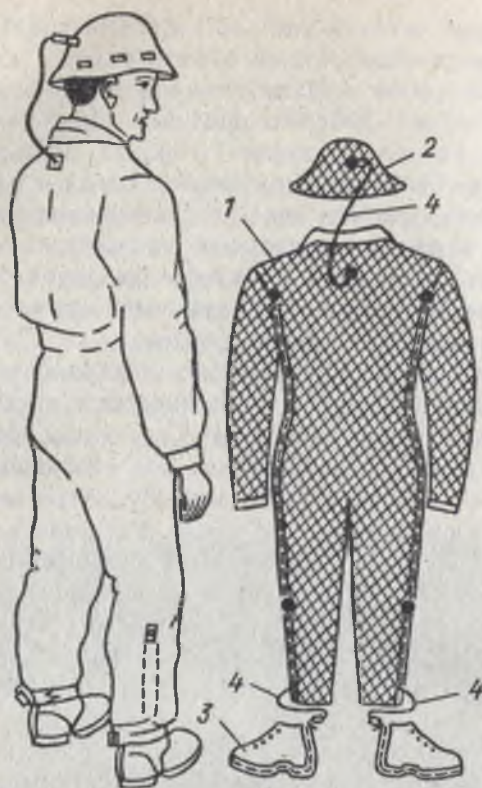


Рис. 14.2. Экранирующая одежда
1 — сетка; 2 — шлем; 3 — ботинки с проводящей подошвой; 4 — перемычка, связывающая части одежды

женные друг от друга атомы, вследствие чего у электронов внешних орбит энергии связи с атомами или молекулами составляют лишь доли электрон-вольта. Под воздействием поля эти слабые связи нарушаются, возникает электронная проводимость и ткань приобретает свойства экрана. В принципе можно создать ткань, электропроводность которой увеличивается с возрастанием напряженности поля.

Однако и существующая металлизированная ткань позволяет создать достаточно эффективную защиту. Электропроводность такой металлизированной одежды зависит от ряда весьма трудно учитываемых параметров, в числе которых не только напряженность поля, но и индивидуальные свойства человека, носящего эту одежду, состояние его кожи, возраст, особенности рецепторов и центральной нервной системы. Поэтому целесообразно добиваться максимальной

электропроводности костюма, приближающейся к электропроводности меди. В ГДР экранирующие костюмы рекомендуются применять в установках напряжением 110 кВ и выше.

Контроль электрических и электромагнитных полей. Расчетам электрических полей уделяется в литературе достаточное внимание. Однако, как бы обстоятельно ни были проведены такие расчеты, экспериментальная проверка и контроль их необходимы. До 1970 г. для этой цели и у нас, и за рубежом применялись косвенные методы [42]. Для текущей эксплуатации они сложны ввиду трудоемкости измерений и недостаточной их точности. Вот почему заслуживает внимания прибор, предложенный Ю. А. Морозовым (рис. 14.3). Это — низкочастотный приемник, характерной особенностью которого является изоляция от земли, достигаемая применением длинной изолирующей опорной штанги. Прибор отличается также своими небольшими размерами и симметричной системой диполя. Опыт эксплуатации этого прибора, изготовленного ВНИИ охраны труда ВСЦПС (г. Ленинград), вполне себя оправдал.

Огромное значение для защиты от воздействия полей имеют организационные мероприятия, предусмотренные правилами эксплуатации и местными инструкциями.

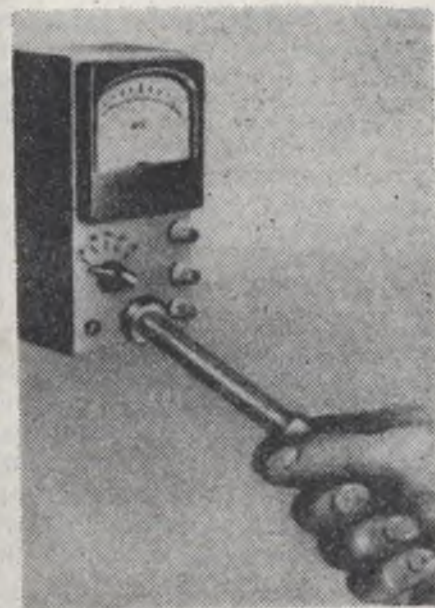


Рис. 14.3. Прибор для измерения напряженности поля

Перечисленный комплекс основных защитных мероприятий дает основания считать, что работы вблизи установок и ЛЭП высокого напряжения могут быть безопасными.

14.4 Защита людей от наведенных напряжений

Проблема защиты людей от наведенных напряжений возникла в СССР в 1925—1926 гг. в связи с постройкой магистральных ЛЭП 110 кВ. Напомним, что напряжения, наведенные на линиях и в устройствах связи, могут возникать в момент неустановившихся (переходных) режимов в линии электропередачи, а в некоторых случаях также при коммутационных переключениях. К числу возможных источников наведенных напряжений следует отнести прежде всего воздушные сети электрифицированного транспорта (на переменном токе — в рабочем и аварийном режимах, на постоянном токе — только в аварийном).

Наведенные напряжения можно подразделить на мешающие и опасные. К мешающим следует отнести напряжения, вызывающие акустические удары в телефонах, ложные срабатывания блокировочных и сигнализационных элементов, нарушения телеграфной связи. Опасными называют напряжения, которые могут вызвать электрическую, акустическую и ожоговую травмы и повредить аппаратуру связи. Опасные напряжения возникают, как правило, только в аварийных режимах (короткие замыкания в сетях напряжением выше 1000 В, обрывы проводов и т. д.), а мешающие — не только в случае аварии, но и в условиях нормальной работы в результате коммутационных явлений на линии электропередачи.

Меры на линиях связи. Защитные мероприятия, направленные на устранение опасности поражения напряжением, наведенным на линии связи, предусмотрены требованиями, изложенными в действующих Правилах [59]. Особенно подробно рассмотрены опасные ситуации (работа во время грозы и дождя). Для предупреждения несчастных случаев категорически запрещено производить какие-либо работы на линиях связи в грозу и при ее приближении. Как правило, запрещена работа также в сырую и дождливую погоду. На случай ликвидации аварии во время дождя предусмотрены дополнительные защитные меры. Запрещено раскатывать под линией электропередачи одновременно несколько ниток проводов: находясь на земле, нельзя прикасаться к лежащим на земле линейным проводам, если их общая длина превышает 600 м.

Огромное значение в упорядочении защитных мероприятий имели требования, изложенные в Правилах [59]: «При параллельном следовании ВЛ (высоковольтной линии.— В. М.) с воздушными линиями связи и сигнализации наименьшее расстояние по горизонтали между ближайшими крайними проводами указанных линий определяется на основании расчета влияния ВЛ на линии связи и сигнализации, однако оно должно быть не менее высоты наиболее высокой опоры ВЛ».

Благодаря вниманию к защите от этой опасности электротравматизм на линиях связи, вызванный наведенными напряжениями, по существу, отсутствует. С 1945 г., т. е. почти за четыре десятилетия, на линиях связи Советского Союза отмечено лишь несколько поражений, вызванных наведенным напряжением.

В свете изложенного может показаться, что говорить о необходимости предотвращения опасности от напряжений, наведенных на линии связи, нет оснований. Но это не так, ибо, во-первых, мощность, а следовательно, и токи однополюсного замыкания, обуславливающие значение наведенных напряжений, быстро растут; во-вторых, проводится широкая электрификация железных дорог на переменном токе, а в этом случае наведенные напряжения возникают и в условиях нормальной работы ЛЭП — в переменных режимах, особенно если напряжение составляет 500 кВ и выше.

В чем же суть проблемы? Она — в наличии противоречий в исходных данных, используемых при расчете влияния воздушных ЛЭП на провода сети. Этот расчет предусмотрен Правилами [59], но они не указывают, по какому «безопасному» току надо рассчитывать допустимые наведенные напряжения. В литературе же называются пределы, значения которых отличаются друг от друга в 5—8 раз. Нет установившейся точки зрения и по вопросу о том, какое напряжение принимать за расчетное. Между тем именно эти данные определяют выбор расстояния от воздушных ЛЭП до линий связи, т. е. в конечном счете объем и стоимость основных мероприятий по обеспечению электробезопасности.

Надо ли в данном случае вести расчет по наихудшему варианту (рефлекторный механизм поражения, отсутствие фактора внимания, случайные прикосновения к проводу уязвимыми к току местами тела)? Нет, целесообразнее вести расчет по минимальному значению наведенного тока. Мнения многих авторов о значении этого тока с достаточной точностью совпадают (10 мА). А это значит, что можно существенно увеличить расчетное наведенное напряжение (во всяком случае, до 250—300 В или даже до значения, обуслов-

проводжались тяжелым исходом, и это надо счесть большой удачей, ибо устранить возможность их появления достаточно сложно. К сожалению, менее благополучно обстоят дела при наладочных работах в радиоизмерительных, радиопередающих и радиоприемных устройствах, в которых в качестве элементов используются конструкции, обладающие емкостью порядка миллифарад. Отключив такое радиоустройство от источника электропитания, недостаточно опытные настройщики аппаратуры приступают к работе, предварительно не разрядив находящиеся в цепи конденсаторы, и иногда жестоко за это расплачиваются.

Глава пятнадцатая

ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА И ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

15.1. Научная организация труда в электроэнергетике

Регламентация требований к электротехническому оборудованию, проводам и кабелям — это начало научной организации труда во всей многозвенной системе электрификации.

Среди всего обилия материалов, излагающих научные основы электрификации, нас в плане охраны труда интересуют прежде всего документы, относящиеся к следующим двум направлениям:

а) стандартизации требований к электрооборудованию (основными документами являются государственные стандарты);

б) стандартизации требований, предъявляемых к строительству и монтажу электрооборудования (основными документами являются «Строительные нормы и правила, ч. III, раздел И, гл. 6. Электротехнические устройства. Правила организации и производства работ» [67] и «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» [60]).

Организация труда при эксплуатации электрооборудования имеет существенные отличия от организации труда при эксплуатации технологического оборудования, и именно здесь с особой остротой возникает проблема разработки ее научных основ.

Научная организация труда (НОТ) при эксплуатации оборудования формируется как отрасль науки об эксплуатации. Для ее окончательного становления требуется развернутое многоплановое изучение, охватывающее области организационных, социологических и инженерно-технологических решений. Важная роль в создании ее основ принадлежит коллективам ведущих энергосистем и Всесоюзному государственному тресту Союзтехэнерго, а также ВНИИНОТ в Ленинграде и Москве.

Научная организация труда в эксплуатации создается не на пустом месте. Она представляет собой и обобщение огромного опыта, накопленного в процессе создания, монтажа и эксплуатации электрооборудования. Этот опыт находит свое выражение в электротехнических правилах. Отсюда — необходимость хотя бы кратко остановиться на структуре, содержании и направленности существующих электротехнических правил.

15.2. Порядок производства работ на электроустановках

Правила эксплуатации электроустановок и безопасности их обслуживания регламентируют очередность этапов работы и технологию производства работ персоналом всех категорий. Основой регламентации является наряд на работу или устное распоряжение.

Работы, проводимые в помещениях или на открытом воздухе на действующих электроустановках, в отношении мер безопасности делятся на четыре категории: а) выполняемые при полном снятии напряжения; б) выполняемые при частичном снятии напряжения; в) выполняемые без снятия напряжения вдали от токоведущих частей, находящихся под напряжением; г) выполняемые без снятия напряжения вблизи от токоведущих частей, находящихся под напряжением, и непосредственно на них.

Под токоведущими частями, находящимися под напряжением, подразумеваются и те части, которые к началу работ не находились под напряжением, но на которые в любой момент может быть подано напряжение.

По наряду могут производиться работы, выполняемые: а) с полным отсутствием напряжения; б) с частичным снятием напряжения; в) под напряжением. По устному распоряжению могут производиться: а) кратковременные и небольшие по объему работы с полным снятием напряжения;

б) кратковременные и небольшие по объему работы с частичным снятием напряжения (только для лиц электропрофес-сий); в) работы вдали от токоведущих частей, находящихся под напряжением.

Каждому работающему по эксплуатации оборудования присваивается квалификационная группа по технике безопасности. Квалификационных групп пять. Они не присваиваются лицам младше 17 лет, поскольку им никакие работы в помещениях с действующим электрооборудованием не разрешаются. Для всех групп, кроме первой, требуется определенный стаж и опыт работы. Характерно, что даже лица, имеющие высшее инженерное образование, ученые степени и звания, но не располагающие опытом эксплуатации оборудования, вначале получают только третью квалификационную группу.

Весь эксплуатационный персонал делится: а) на должностных инженерно-технических лиц, выдающих наряды или отдающих устные распоряжения; б) на технический персонал, допускающий членов бригады непосредственно к работам на подстанциях, распределительных пунктах, кабельных и воздушных линиях; в) наблюдающих, которые могут совмещать наблюдение за работой с ее руководством, но только при наличии у них высшей квалификационной группы по технике безопасности; г) на членов бригады. Четко определяются права и обязанности лиц, относимых к каждой из этих категорий, и их ответственность за определенный цикл работ или операций. Обращается особое внимание не только на допуск к работам, но и на окончание, в частности на закрытие нарядов.

В правилах и составленных на их основе производственных инструкциях детально указываются способы выполнения каждой из возможных работ и условия, без наличия которых они не могут производиться. Этот на первый взгляд сложный порядок организации работ, принятый на электроустановках, продиктован опытом работы. Его внедрение привело к ликвидации ряда очагов электротравм, и там, где он соблюдается полностью, поражение электрическим током — редчайшее событие.

15.3. Электротехнические правила

Электротехнические правила существуют в каждой промышленно развитой стране, отражая на фоне общих, присущих всем странам положений и требований индивидуальный, местный опыт. Отечественные правила, стандарты и нор-

ны по своему объему, полноте, глубине и научной обоснованности занимают одно из ведущих мест в мире. Тем недопустимее их нарушения, а они еще встречаются, и притом нередко.

Электрификация сельскохозяйственных, коммунальных и некоторых других предприятий опережает подготовку персонала. Именно здесь можно найти немало примеров низкой культуры обслуживания и грубейших нарушений электротехнических правил. Эти примеры поучительны, и ниже они приводятся.

Ряд авторов считает, что нарушение правил — основная причина электротравм. С таким категорическим утверждением согласиться нельзя, ибо от него недалеко до господствующего в литературе капиталистических стран мнения, будто почти во всех электротравмах повинны пострадавшие. Причины электротравматизма намного более сложны, и прямой зависимости между поражением и промахом работающего зачастую, конечно, нет. Но в то же время было бы ошибкой, как говорится, сваливать вину только на администрацию. Имеются случаи вредной удачи и лихачества, т. е. грубейших нарушений основных элементарных требований правил. Приведем некоторые из таких случаев.

Пример 15.1. Мастер К. имел самодельный ключ от трансформаторного помещения, находившегося в его доме. В этом помещении он хранил свои домашние вещи. Сын его, зная это, во время сна отца после ночного дежурства взял ключ, забрался с приятелем в трансформаторное помещение для того, чтобы взять велосипед, и ради шутки накинул тонкую проволоку на разъединитель. Сам он погиб, а его товарищ получил тяжелое повреждение глаз. Нет нужды перечислять преступные нарушения правил, допущенные мастером К. За них он был уголовно наказан.

Пример 15.2. Л., по образованию техник, производя включение испытательной высоковольтной установки, не проверила местонахождения своего помощника и без предупреждения подала напряжение на трансформатор. Помощник ее, в это время поправлявший провод со стороны высшего напряжения, был смертельно поражен.

Пример 15.3. Бригада монтеров под руководством бригадира П., не проверив отсутствия напряжения на свалившейся во время ветра деревянной опоре линии передачи 6 кВ, начала ее подъем. При случайном касании двое монтеров были поражены электрическим током. И здесь нет нужды приводить пункты правил, которые были не выполнены.

Приведем примеры из статьи Ю. В. Копытова и Л. И. Вайнштейн [32].

Пример 15.4. В г. Кирове старший электромонтер производил без наряда чистку в ТП 6 кВ фарфоровых вводов, находившихся под напряжением. В процессе работы он дотронулся до токоведущих частей и был смертельно поражен током. Здесь налицо ряд нарушений: не было наряда, работа производилась без средств личной защиты и без наблюдающего.

Подобных нарушений в Кировской области много, варьируются условия касания — рукой, инструментом и т. д.

Пример 15.5. Инженер-электрик колхоза «Победа» той же области должен был снять неисправный трансформатор с мачтовой подстанции. Поднявшись на подстанцию, он не запер привод отключенного разъединителя, не повесил предупредительного плаката и не проинструктировал приехавшего с ним шофера. Шофер без какой-либо надобности начал передвигать лестницу и тем самым включил разъединитель. Инженер, коснувшийся шины, до этого не находившейся под напряжением, был убит.

Пример 15.6. В Щелковском районе Московской области старший электромонтер IV и электромонтер III квалификационных групп по технике безопасности прибыли в пос. Гребнево для ремонта линии 380/220 В. После отключения рубильника сети напряжением 380 В на мачтовой подстанции № 460 монтер III группы поднялся на опору. При этом он не надел диэлектрических перчаток, не проверил наличия напряжения и не заземлил линию. В момент начала работы монтер был поражен электрическим током. Расследованием установлено, что работу надо было производить на подстанции № 499, а не № 460. Старший электромонтер плохо знал схему сети; как лицо контролирующее, он не сделал замечания о нарушении мероприятий по технике безопасности и не принял участия в подготовке рабочего места. Кроме того, им было сделано и еще одно грубое нарушение. Увидя, что его товарищ попал под напряжение, он не принял немедленно мер для его отключения от сети на месте, а поехал на питающую подстанцию для отключения линии.

Пример 15.7. Начальник электроцеха Загорского стройкомбината Московской области в присутствии электромонтера (оба были в нетрезвом состоянии) без проведения необходимых отключений и других требующихся подготовительных мероприятий вошел в камеру выключателя ВМГ-133 для проведения его ремонта, попал под напряжение и получил тяжелые ожоги.

Пример 15.8. В Москве на одном из автомобильных заводов два электромонтера приступили к демонтажу бездействующего кабеля на цеховой сборке 380/220 В; не оформив допуска и не сняв напряжения, а также не приняв других мер, они приступили к работе. В результате прикосновения к шине 380 В один из монтеров был смертельно поражен током.

Нами приведены примеры электротравм, происшедших на протяжении всего шести месяцев в двух областях. Они характерны прежде всего для сельскохозяйственных и коммунальных сетей. Здесь особенно отчетливо видно, что выпол-

нением элементарных правил эксплуатации можно избежать ненужных трагедий.

Наряду с этим хочется привести примеры, когда правила нарушаются лицами, отлично знающими их дисциплинирующее значение. Вот два таких случая.

Пример 15.9. Техник с 25-летним стажем работы на электроустановках передавал дежурство по 10-киловольтной преобразовательной подстанции, вошел вместе со своим сменщиком в ячейку высоковольтного реактора, всего за несколько часов до этого введенного им же в действие, и, чтобы предупредить сослуживца об опасности, сказал: «Оборудование находится под напряжением». При этом, видимо, желая подчеркнуть жестом значение своих слов, он машинально взялся рукой за голую шину, находившуюся под напряжением. Электрическая дуга вызвала тяжелый исход.

Пример 15.10. Опытный инженер, преподаватель техники безопасности, известный своей аккуратностью, взялся наладить физиотерапевтическую высокочастотную установку. При этом он, рассчитывая на свою осторожность, работал под напряжением. На втором часу работы он на глазах у своего помощника получил удар током, коснувшись зажимов, которые вследствие неполадок в схеме оказались под напряжением. Это привело к смертельному исходу.

Что произошло? Почему квалифицированные, пунктуальные люди нарушили правила и тяжело пострадали — осталось тайной.

Из всего сказанного надо сделать выводы. 1. Настало время критического пересмотра правил со всем многообразием содержащихся в них требований. Целью такого пересмотра должен быть отбор минимума сведений, которыми обязан владеть эксплуатационный персонал. Этот строго регламентированный объем сведений каждый эксплуатационный работник должен знать в совершенстве, понимая их жизненно важную необходимость и со своей стороны требуя знания их от подчиненных. 2. Некоторая часть правил должна быть знакома всем, кто в любой степени имеет дело с электричеством. Объем этих общегражданских правил должен быть отобран на основе всестороннего серьезного изучения. 3. Должны быть созданы научные основы организации труда, причем обязательную документацию следует разграничить на правила, предусматривающие в основном действия человека, и на справочные данные, прилагаемые к правилам и обобщающие материалы стандартов. Должна существовать еще более четкая взаимосвязь между обязательной справочной информацией и материалами стандартов. 4. Крайне полезна, по-видимому, и унификация формы, в которой преподносятся разнообразные правила (наименования составных частей

текста, его деление на разделы, главы и параграфы). Необходимо рациональное соотношение между основным текстом и приложениями и многое другое, направленное на упрощение, на единообразие обязательных технических документов. Таковы общие соображения по фундаментальным документам основ научной организации труда — правилам.

В этом плане заслуживает внимания решение Государственной инспекции по энергетическому надзору Минэнерго СССР — объединить в едином документе правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей [60]. Хотя авторы решения ставили перед собой очень сложную задачу, а именно устранение противоречий между требованиями в эксплуатации электроустановок в энергосистемах и требованиями в эксплуатации электроустановок потребителей, унификация требований, как показал опыт последних лет, все же привела к повышению надежности эксплуатации электротехнических установок и электрооборудования, что, несомненно, отразилось и на снижении электротравматизма [9, 60]. Следующим этапом упрощения объединенных правил, возможно, станет разработка единого документа — «Кодекса эксплуатации электроустановок», в котором особое внимание, надо полагать, будет уделено требованиям безопасной эксплуатации квартирно-бытовых и сельскохозяйственных электросетей, а также совершенствованию эксплуатируемого в этих сетях электрооборудования. Это позволит решить давно назревшую задачу повышения уровня электробезопасности в этих группах потребителей электроэнергии до общепромышленного уровня.

15.4. Средства личной защиты

Определения. В Правилах [60] говорится: «Защитными средствами называются такие приборы, аппараты и переносные приспособления, которые имеют целью защитить персонал, работающий в электроустановках на частях или вблизи частей, обычно находящихся под напряжением, от поражения электрическим током, действием электрической дуги и т. д.». Далее, в этом же разделе Правил перечисляются защитные средства и дается их классификация, из которой видны недостатки приведенного определения. Так, перчатки, галоши, боты и даже резиновые коврики, относимые к средствам личной защиты, не являются ни приборами, ни даже приспособлениями, хотя это и вытекает из текста определения. Перчатки и галоши правильнее отнести к элементам про-

производственной одежды (прозодежды). Примерами прозодежды могут служить водолазный костюм, одежда космонавтов, выходящих в космос, и т. п., если понимать под производственной одеждой, без которой выполнять производственные операции невозможно. Инструмент с изолирующими ручками, штанги и клещи для снятия предохранителей правильнее именовать переносным инструментом, снабженным дополнительной изоляцией.

Определенную ясность в терминологию вносит предлагаемая в настоящее время унификация терминов, которая намного облегчает и упорядочивает сравнительную оценку различных индивидуальных защитных средств, устраняет разноречивость в толковании многих понятий и тем самым позволяет повысить качество издаваемой в стране научно-технической, методической и нормативной литературы по данному вопросу, а стало быть, и улучшить подготовку кадров по охране труда.

Так, специальная одежда (спецодежда) определяется как средство индивидуальной защиты тела человека в производственных условиях от вредных факторов внешней среды, воздействующих через кожные покровы. Спецодежда делится на защитную, особую, производственную и т. д.

С точки зрения электробезопасности к особой спецодежде следует отнести одежду из электропроводящей ткани, являющуюся своеобразным экраном, необходимым при работе в зоне электромагнитных и электрических полей большой напряженности.

Но в этой очень подробной классификации защитных средств (индивидуальная защита рук, ног, зрения и т. д.) ничего не упоминается о таком распространенном виде спецодежды, как резиновые боты. И это, конечно, неслучайно. Являясь достаточно надежным изолирующим средством, предупреждающим включение человека в опасную для него электрическую цепь, боты вместе с тем ввиду их тяжести сильно затрудняют движения человека, уменьшают его оперативные возможности и тем самым повышают опасность аварийного развития происшествия, препятствуют быстрому оказанию помощи пострадавшему.

Весьма ценным нововведением является разработка терминологии, относящейся к качественной оценке индивидуальных защитных средств.

Так, введено понятие о коэффициенте защиты, показывающем, во сколько раз данное средство индивидуальной защиты снижает вероятность воздействия вредного фактора. Он определяется как отношение значения вредного фактора при отсутствии защиты к его значению в пространстве, огра-

ниченном средствами индивидуальной защиты. Оценке эффективности защиты способствует и такой термин, как время защитного действия, т. е. время, в течение которого данное средство индивидуальной защиты обеспечивает защиту от вредного фактора.

Классификация. Защитные средства делятся Правилами [60] на четыре основные группы.

К первой группе относятся изолирующие защитные средства, предохраняющие человека от непосредственного соприкосновения с токоведущими частями оборудования, с любыми элементами электрической цепи, оказавшимися под напряжением. Сюда Правила относят и изолирующие элементы прозодежды — перчатки, рукавицы, галоши, и специальный инструмент, снабженный изолирующими элементами, и т. п.

Вторую группу составляют контрольные сигнализирующие приборы, указывающие наличие напряжения на оборудовании (индикаторы напряжения), или приборы, указывающие наличие тока в электрической цепи (токоизмерительные клещи).

К третьей группе отнесено то, что можно назвать защитными приспособлениями. Это прежде всего защитные переносные заземления, изолирующие подставки и т. д. Оградительные плакаты отнесены Правилами к этой же группе, хотя правильнее считать их организационным мероприятием.

Наконец, последнюю, четвертую, группу составляют защитные средства, не связанные непосредственно с поражением током, а именно защитные очки, шлемы, противогазы, брезентовые рукавицы и т. д.

При пересмотре Правил следует обсудить возможность более простого деления средств личной защиты, а именно на инструментальные, сигнальные, организационные, прозодежду и защитные приспособления.

Требования, предъявляемые к средствам личной защиты. Исходя из изложенного инструментальные защитные средства, предназначенные для работ под напряжением, должны иметь полноценную изоляцию, т. е. обладать соответствующими электрофизическими характеристиками, большими удельными и поверхностными сопротивлениями, большим пробивным напряжением, небольшим углом потерь и т. д.

Элементы защитных средств должны обладать изолирующими свойствами соответственно напряжению установки, для которой они предназначены. Но испытательное напряжение их, как вытекает из требований Правил, может и не коррелироваться с рабочим напряжением, ибо прозодежда может служить основным защитным средством только в установках

напряжением ниже 1000 В. Естественно, что в установках более высокого напряжения прозодежда должна применяться в дополнение к средствам, обладающим изоляционными свойствами, соответствующими параметрам изоляции электрооборудования. Это прежде всего относится к изоляции оперативных штанг, индикаторных приборов и т. д.

Правила перечисляют изоляционные материалы, используемые при изготовлении защитных средств. Однако рекомендации Правил не учитывают огромного развития изоляционной техники, на которое, в частности, указывалось в § 10.1.

Еще в 1964—1965 гг. были разработаны и созданы надежные в носке, удобные в обращении изоляционные перчатки из латекса. Позднее были разработаны перчатки из литой резины. Коллектив Кабельной сети Ленэнерго, где в опытной эксплуатации находились эти перчатки, дал им отличную оценку. Выборочная контрольная проверка перчаток из литой резины дала возможность сделать четкий вывод: наконец-то появилось хорошее средство личной защиты. На рис. 15.1 изображена слева перчатка из литой резины, а справа — плоская перчатка из клееной резины.

Перчатки из литой резины очень удобны. С их помощью число работ, проводимых непосредственно под напряжением ниже 1000 В, значительно возросло. Однако после изготовления опытной партии литых перчаток прошло более двадцати

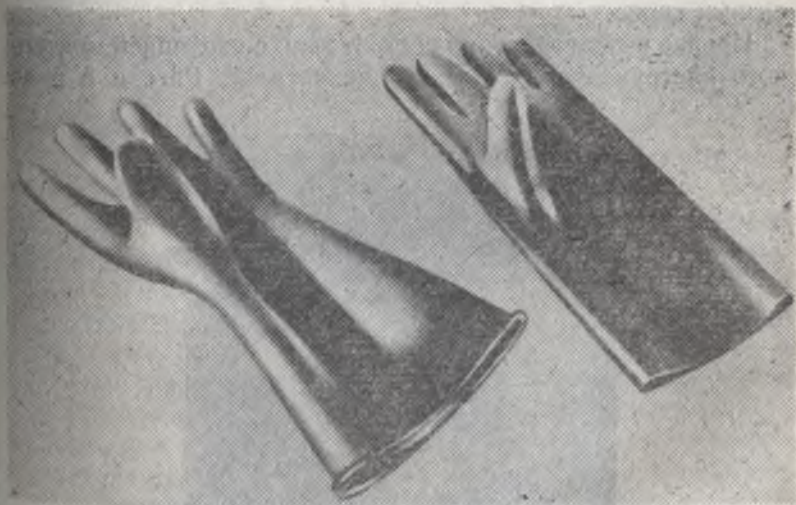


Рис. 15.1. Изолирующие перчатки

лет, а массовый выпуск их все еще не налажен. Эксплуатационный персонал по-прежнему применяет грубые, крайне неудобные в работе перчатки из клееной резины.

Подлежат совершенствованию также дополнительные изолирующие устройства. Они должны выполняться из материалов, обладающих удельным сопротивлением $10^{10} - 10^{11}$ Ом·м при пробивном напряжении 100—150 кВ. Современные изоляционные материалы позволяют добиться этого.

Защитный щиток для глаз, созданный в Кабельной сети Ленэнерго и пользующийся большим успехом у монтеров, показан на рис. 15.2. Несмотря на исключительную простоту массового изготовления таких защитных щитков, в пользовании их нет.

Недостает электрикам и надежной изолирующей обуви — галош. Проведенный нами анализ результатов контрольных и эксплуатационных испытаний специальных резиновых галош показал, что галоши «пробиваются» после 2—3 испытательных сроков. Правда, они теряют свои изоляционные качества почти в 2—3 раза скорее, чем резиновые перчатки, выдерживающие при аккуратном пользовании 6—7 испытательных сроков. К сожалению, выпуск специальных резиновых галош значительно отстает от потребности. Электрики вынуждены в качестве изолирующих галош использовать обычную резиновую обувь. Испытание этой обуви на электрическую прочность показывает, что 60—70 % новых галош рядового торгового ассортимента приходится браковать, оставшиеся же выдерживают лишь один, реже два испытательных срока.

Крайне неблагоприятно обстоит дело с изоляцией монтерского инструмента. В Москве, Ленинграде, Риге и в ряде



Рис. 15.2. Защитный щиток

других городов на многих предприятиях кустарно делают изоляционные грубки, которые затем насаживают на ручки инструментов. Как бы удачно ни были они изготовлены, мириться с этим нельзя.

Необходим стандарт на инструмент с изолирующим покрытием, и нужно планирование его выпуска на инструментальных заводах в массовом количестве.

Необходимо, по-видимому, серьезное вмешательство органов охраны труда ВЦСПС для того, чтобы передовые достижения промышленности в области изоляционной техники систематически внедрялись в производство защитных средств.

Комплектация и испытания. Разнообразие в выборе защитных средств, различия в их защитных возможностях и областях применения, естественно, требуют того, чтобы работа по комплектованию ими производственных предприятий, участков и бригад велась планомерно и продуманно. Комплектование защитными средствами возложено по предприятию в целом на главного инженера, а по рабочим бригадам — на начальников цехов, участков, отделов, лабораторий. В комплект защитных средств должно входить только то, что обеспечивает технологию работ, которые возложены на данное производственное подразделение. Так, переносное защитное заземление обязательно должно входить в комплект защитных устройств, имеющих на подстанции и на распределительном устройстве, но его не должно быть в бригаде и цехе, обслуживающих сети и установки напряжением ниже 1000 В.

Обслуживать цеховые пусковые устройства, имеющие ручное управление, разрешается только в изолирующих перчатках и галошах. Посещать открытые подстанции любого напряжения можно только в изолирующей обуви.

Правилами [60] предусматриваются системы учета, хранения и выдачи средств личной защиты. Существует строгий порядок пользования ими. Перед каждым использованием средств личной защиты работающий должен лично убедиться путем внешнего осмотра в отсутствии наружных повреждений, пыли, влаги на них и т. д.; он должен проверить по клейму сроки последней периодической проверки и установить, не истек ли испытательный срок. Применение средств личной защиты допускается только там, где это предусмотрено Правилами, или при явной аварийной необходимости. Основные изолирующие параметры средств личной защиты подвергаются периодической проверке. Проверяется электрическая прочность. При испытании на постоянном напряжении допол-

нительно измеряется ток утечки. В этом случае значение испытательного напряжения по сравнению с испытанием на переменном напряжении увеличивается в 2,5 раза. Правилами предусмотрен соответствующий порядок оформления результатов испытания.

Механическое испытание изолирующих штанг производится после их изготовления или капитального ремонта. Электрические испытания изолирующих штанг, предназначенных для измерений, проводятся один раз в год, а в сезон измерений — один раз в три месяца. В энергосистемах и на предприятиях, имеющих крупное энергохозяйство, испытания осуществляются персоналом электротехнических лабораторий.

Хуже обстоят дела с испытанием повышенным напряжением средств личной защиты на мелких промышленных и коммунальных предприятиях. Создание при энергосистемах подразделений для централизованного обслуживания электрическими испытаниями таких предприятий является весьма актуальной задачей, тем более, что опыт отдельных энергосистем показывает возможность практической реализации этого предложения. К сожалению, прогресса в этом почти не ощущается.

В некоторых промышленных районах испытание средств личной защиты производят наладочные организации строительного-монтажных управлений. Но это не всегда удобно. Наиболее целесообразно значительно расширить выпуск переносной испытательной аппаратуры и наладить эти испытания всюду, где имеется более или менее систематическое использование средств личной защиты.

Мы рассмотрели некоторые важнейшие изоляционные средства личной защиты, более подробные материалы о них можно найти в книге П. А. Долина [21]. Наше рассмотрение показывает важное значение этих средств в обеспечении надежной и безопасной эксплуатации электрооборудования и в то же время вскрывает существенные недостатки в их комплектации и изготовлении. Отсюда — необходимость в применении и других средств личной защиты. К ним относятся согласно действующим Правилам в первую очередь приборы и устройства, сигнализирующие о наличии напряжения, т. е. о наличии потенциально возможной опасности поражения.

15.5. Сигнализация наличия напряжения

Сигнализация наличия напряжения необходима прежде всего для обеспечения нормальной технологии генерирования, преобразования, передачи и потребления электроэнергии. Обычно она осуществляется стационарными приборами, устанавливаемыми на пультах управления, на технологическом оборудовании и просто в помещениях.

Но нужна и иная сигнализация наличия напряжения — индивидуальная, позволяющая каждому работающему узнавать о наличии напряжения без стационарных приборов. Устройства и приборы, обеспечивающие такую сигнализацию, относятся согласно определениям Правил [60] к средствам личной защиты. Об их важности говорит то, что непосредственную опасность электричества, если нет искрения, человек своими органами чувств обнаружить не может. Наличие напряжения на токоведущих частях в аварийной ситуации устанавливается по действию электричества на какой-либо индикатор или же по показанию прибора.

Сигнализация наличия напряжения относится к основным мероприятиям безопасности. С этой точки зрения достаточно знать, есть напряжение или нет. Как правило, значение напряжения известно по параметрам установки, поэтому вполне можно обойтись сигнальными приборами, относящимися к группе индикаторных. Индикаторы (указатели) напряжения появились давно, однако совершенных конструкций их как в сетях напряжением выше 1000 В, так и в сетях напряжением ниже 1000 В мало и изготавливаются они, особенно для последних, в крайне ограниченном количестве. Потребность в указателях напряжения ниже 1000 В покрывается кустарным их изготовлением в мастерских и лабораториях энергосистем, крупных предприятий. Указатели напряжения описаны П. А. Долиным [21] и, пожалуй, еще полнее В. И. Козловым [30], материалы которого нами использованы при освещении данной темы.

В зависимости от напряжения, наличие которого необходимо определить, указатели напряжения можно разделить на две группы: указатели напряжения выше 1000 В и указатели напряжения ниже 1000 В.

Указатели напряжения выше 1000 В. Принцип их действия основан на использовании: а) протекания емкостных токов (емкостные указатели напряжения); б) электрического поля; в) реактивных усилий, возникающих при разрядах на остриях приборов.

Наибольшее распространение получили емкостные указатели напряжения. Впервые емкостный указатель был разработан в 30-х годах профессором А. Циппом в Германии, и в течение длительного времени фирма, монополизировавшая его изготовление, снабжала им многие страны, включая и СССР. Но затем оригинальная конструкция емкостного указателя была предложена инженерами Ленэнерго А. А. Давидовым и Г. Д. Штробергом. Указатели их конструкции в течение многих лет изготавливались в мастерских Ленэнерго, которые обеспечивали ими не только Ленинградский промышленный район. Рассмотрим принцип действия этих указателей.

Конденсаторы, находясь под напряжением в электрическом поле, возникающем вблизи токоведущих частей, заряжаются. Напряжение вызывает свечение неоновой лампы, свет которой виден через отверстие в трубке на некотором расстоянии от токоведущей части. Чтобы увеличить свечение, надо щупом коснуться токоведущей части. При проверке наличия постоянного напряжения свечение возникает только в момент этого касания.

Схема этого емкостного указателя претерпела некоторые изменения. Так, с началом промышленного изготовления малогабаритных неоновых ламп тлеющего разряда с током в пределах микроампера, предназначенных специально для указателей высокого напряжения, отпала необходимость соединять вторую обкладку конденсатора с землей. В электроустановках напряжением 20 и 35 кВ и более не стал нужным конденсатор, поскольку горение лампы обеспечивается током, обусловленным емкостью между цоколем лампы и землей.

Выпускаемый промышленностью указатель напряжения типа УВН-80 предназначен для проверки наличия напряжения 2—10 кВ включительно в закрытых электроустановках. Принципиально его конструкция мало отличается от описанной. Для контактирования указатель снабжен крючкообразным наконечником. Наиболее допустимое напряжение, при котором возникает отчетливо видимое свечение указателя, составляет 800 В. Обычно это напряжение равно 500—550 В.

Несколько отличен от описанных выше указатель напряжения типа УВН-90, применяемый для закрытых электроустановок и сетей напряжением 35 и 110 кВ. Он состоит из собственно указателя и телескопической штанги. Первый представляет собой короткую трубку из хорошо изолирующего материала, внутри которой укреплена неоновая лампа тлеющего разряда типа НС-110. Верхний конец трубки за-

крыт наглухо крышкой, сквозь которую проходит металлический шуп указателя, а нижний конец остается открытым: через него оператор наблюдает за свечением лампы. Один контакт неоновой лампы соединен через небольшой искровой промежуток с металлическим шупом указателя, а другой — с металлической контактной пластинкой, укрепленной на нижнем конце указателя. Когда указатель укреплен на штанге, эта пластинка оказывается соединенной с обкладкой трубчатого конденсатора, который представляет собой конец изолирующей штанги.

Таким образом, при касании шупом указателя токоведущих частей, находящихся под напряжением, лампа указателя загорается при протекании через нее тока, обусловленного емкостью обкладки конденсатора относительно земли.

Для воздушных ЛЭП и открытых подстанций напряжением 110, 220 и 380 кВ нашел применение указатель напряжения конструкции ЦВЛ Мосэнерго. Размеры его $155 \times 110 \times 60$ мм. Указатель крепится на рабочем конце изолирующей штанги, предназначенной для наложения временных переносных заземлений на электроустановках соответствующего напряжения. Принцип работы тот же, что и у рассмотренного выше указателя. Наличие напряжения фиксируется свечением неоновой лампы тлеющего разряда типа МН-3, один контакт которой присоединен через небольшой (1,5 мм) искровой промежуток к шупу указателя, а другой — к металлической втулке. Эта втулка и соединенный с нею стержень, а также металлическая головка штанги, в которой закрепляется указатель, составляют вместе одну из обкладок конденсатора, емкость которого и обуславливает протекание тока через лампу, а следовательно, и ее свечение. Второй обкладкой конденсатора является земля. Наблюдение за свечением лампы ведется через нижний открытый торец трубки корпуса, который снабжен затенителем — конусообразным экраном.

Недостатком указателей, работающих на принципе протекания емкостных токов, являются: а) необходимость контакта (или сближения до расстояния 1—2 см) с токоведущими частями для определения наличия напряжения; б) малый диапазон напряжений, при котором действует указатель (если напряжение электроустановки ниже напряжения, на которое рассчитан указатель, сигнал о наличии напряжения отсутствует, а это может привести к аварии или несчастному случаю); в) опасность работы с указателем на открытом воздухе во время дождя, изморози, тумана из-за возможности перекрытия изолирующей части указателя; г) ненадежность неоновых ламп.

До сих пор рассматривались указатели напряжения со световым сигналом. Имеются и звуковые. Звуковой указатель напряжения предназначен для открытых и закрытых электроустановок переменного тока частотой 25—60 Гц, напряжением до 230 кВ. Указатель имеет следующие основные части: медный диск, играющий роль антенны, двухступенчатый транзисторный усилитель, опирающийся транзистор, звуковой генератор на полупроводниках, батареи, громкоговоритель. Все эти части смонтированы на шасси и помещены в трубку из изоляционного материала. Эта трубка, являясь корпусом указателя, с помощью муфты крепится на конец изолирующей штанги соответствующего напряжения. Основные части указателя размещены в его корпусе (трубке) так, что медный диск находится в верхней части трубки, а громкоговоритель — в нижней.

При поднесении указателя к проводнику, находящемуся под напряжением, он оказывается в электрическом поле проводника, которое индуцирует ток в антенне усилителя. Этот ток усиливается и приводит в действие звуковой генератор, сигналы которого слышны из громкоговорителя. Наивысшая громкость звуковых сигналов, издаваемых громкоговорителем, обеспечивается при следующих расстояниях указателя от проводника: 2,5 см — при напряжении 4 кВ; 10 см — при 13 кВ; 30 см — при 26 кВ; 45 см — при 33 кВ; 90 см — при 110 кВ; 180 см — при 230 кВ. При напряжении электроустановки ниже 4 кВ для получения сигналов о наличии напряжения необходимо подводить антенну указателя вплотную к проводу ЛЭП. При напряжении ниже 440 В указатель не работает.

Указатель напряжения можно вмонтировать в защитный шлем из синтетического материала. В верхнюю часть шлема помещают миниатюрный транзисторный датчик (антенну). При приближении человека к установкам, находящимся под напряжением, в антенне индуцируется ток. Этот ток после усиления и преобразования приводит в действие миниатюрный динамик, который и издает достаточно громкий звуковой сигнал. Устройство питается от железоникелевых аккумуляторов, которые без труда подзаряжаются от сети переменного тока напряжением 380/220 В.

Использование электрического поля для определения наличия напряжения на токоведущих частях электроустановок и проводах ЛЭП дает ряд преимуществ по сравнению с использованием емкостных токов. Но «полевые» указатели имеют и существенный недостаток — относительно узкие пределы индикации по напряжению. Даже у наиболее чувствитель-

ного указателя нижний предел составляет 2 кВ, большинство же таких указателей работает в пределах 35 кВ и выше. В этом отношении лучшим является американский указатель напряжения со звуковым сигналом.

Указатели, работающие на принципе использования реактивных усилий, возникающих при разрядах на остриях приборов, нашли применение в высоковольтных электрических установках связи, телемеханики и других устройствах главным образом в США и Франции.

Необходимость в специализированных индикаторах возникает и в протяженных, многократно разветвляющихся сетях, где подчас бывает трудно отличить нулевой провод от фазного. Н. С. Беккер и Л. О. Петри предложили оригинальное устройство, делающее эту ошибку маловероятной.

Многие из применяемых указателей не свободны от существенных недостатков, таких, как узкие пределы измерения, необходимость непосредственного контакта щупа с токоведущими частями, сложный сигнал, нетехнологичность и хрупкость конструкции. Все это заставляет, подытоживая сказанное, с сожалением отметить отсутствие оптимального прибора для индикации напряжения выше 1000 В.

Указатели напряжения ниже 1000 В. Существенное отличие указателей напряжения ниже 1000 В заключается в необходимости во всех случаях непосредственного контакта щупа с контролируемой токоведущей шиной, проводом, зажимом. Сигналом о наличии напряжения является свечение неоновой лампы, встроенной в изоляционную трубочку карандашного типа и размера с отверстием для наблюдения за лампой. Последовательно с неоновой лампой у этих указателей включены элементы активного сопротивления.

Указатели бывают двухполюсными и однополюсными [21]. Двухполюсный указатель имеет два щупа, в одном из которых вмонтирована неоновая лампа, а второй представляет собой простую изоляционную пластмассовую трубку. Оба щупа, рабочий и вспомогательный, соединены друг с другом гибким проводом с надежной изоляцией длиной до 1 м. Чтобы определить наличие напряжения между двумя точками цепи, надо щупами, которые человек держит в правой и левой руках, коснуться этих двух точек. Таким образом, основными элементами двухполюсного токоискателя являются сигнальная неоновая лампа, элемент сопротивления, соединительный провод и два щупа. В качестве сигнальных ламп применяются миниатюрные неоновые лампы тлеющего разряда типов МН-7, ВМН-1 и др. Элемент добавочного сопротивления ограничивает ток, протекающий через лампу, до значения,

равного наибольшему допустимому рабочему току.

Недостатками двухполюсных указателей напряжения ниже 1000 В являются узкий диапазон определяемых напряжений (60—600 В), необходимость контакта с токоведущими частями, нечеткий сигнал и, наконец, ненадежность неоновых ламп.

Однополюсные указатели напряжения предназначены для индикации напряжения между токоведущими частями и землей и требуют прикосновения лишь к одной, испытуемой, токоведущей части. Связь с землей образуется через тело человека, который, касаясь пальцем руки указателя, создает контакт с цепью указателя. Ток, протекающий через указатель, порядка микроампер и не ощущается человеком. В то же время он обеспечивает отчетливо видимое свечение сигнальной лампочки.

Однополюсным указателям напряжения обычно придают вид автоматической ручки. При этом в корпусе, выполненном из изоляционного материала и имеющем смотровое отверстие, размещают сигнальную лампочку и элемент добавочного сопротивления; на нижнем конце укрепляют металлический щуп, а на верхнем — плоский металлический контакт, которого и должен коснуться палец человека. Иногда однополюсные указатели изготавливаются в виде отвертки, в рукоятке которой размещены лампочка и элемент сопротивления. Щупом в этом случае является лезвие отвертки.

Конечно, те и другие указатели в сетях напряжением ниже 1000 В имеют недостатки, однако даже при наличии их безопасность обслуживания резко возрастает. Во всяком случае они обладают для индикации напряжения несравненными преимуществами по сравнению с лампами накаливания, именуемыми контрольными лампами. Зарегистрирован ряд электротравм, возникших в процессе контроля напряжения с помощью ламп накаливания. Применение последних для целей контроля недопустимо.

Рассмотрение указателей напряжения хочется закончить описанием результатов исследования [30], посвященного возможности индикации напряжения на ЛЭП с помощью магнитометра. Использование магнитного поля ЛЭП открывает возможность конструирования универсального прибора для определения наличия напряжения на проводах ЛЭП ниже и выше 1000 В.

В работе [30] убедительно доказана целесообразность использования многослойной катушки с сердечником из металлических ферромагнитных материалов в качестве антенны индикатора напряженности магнитного поля. ЭДС, индукти-

руемая в антенне, усиливается с помощью усилителя низкой частоты (50 Гц) до значения, достаточного для приведения в действие сигнализации или других устройств. Уменьшению массы и габаритов устройства и повышению его надежности способствует выполнение усилителя на транзисторах.

Принцип определения наличия напряженности на проводах ЛЭП с помощью указателя напряженности магнитного поля можно сформулировать следующим образом: переменное магнитное поле частотой 50 Гц (существующее вокруг проводов ЛЭП) индуцирует в антенне (в магнитоприемнике с ферромагнитным сердечником), расположенной на расстоянии не менее 1 м от проводов, переменную ЭДС, которая подается на вход транзисторного усилителя; напряжение на выходе усилителя используется для приведения в действие сигнализации или исполнительных устройств.

Широкое внедрение сигнализаторов напряжения, несомненно, будет способствовать значительному уменьшению числа электротравм. В этой области особенно важны новые идеи, новые решения, новые приборы.

Глава шестнадцатая

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА ОХРАНЯЕТСЯ ЗАКОНОМ

16.1. Основы законодательства по охране труда и технике безопасности

Законодательное обеспечение безопасности труда. Нарушение администрацией предприятия, любым из его должностных лиц санитарно-гигиенических нормативов и правил безопасности влечет за собой наказание даже тогда, когда это нарушение еще не успело нанести ущерба здоровью работающего, не привело к его гибели. В соответствии с Трудовым кодексом должностное лицо, ответственное за невыполнение установленных правил и требований охраны труда, подвергается административному наказанию или денежному штрафу. В Уголовном кодексе предусматривается уголовное наказание должностных лиц за нарушение правил, могущее нанести ущерб здоровью работающего. Нарушение же правил, сопровождающееся «ущербом здоровью» работающего, наказывается особенно строго. Степень наказания определяет суд, который с помощью соответствующей технической и судебно-

медицинской экспертизы устанавливает в судебном заседании ответственность лиц за те или иные нарушения.

В Уголовном кодексе РСФСР имеется статья 140, носящая название «Нарушение правил охраны труда». Текст статьи таков:

«Нарушение должностным лицом правил по технике безопасности, промышленной санитарии или иных правил охраны труда, если это нарушение могло повлечь за собой несчастные случаи с людьми или иные тяжелые последствия, наказывается лишением свободы на срок до одного года, или исправительными работами на тот же срок, или штрафом до ста рублей, или увольнением от должности».

Подчеркнем еще раз, что наказываются люди за нарушение правил безопасности и охраны труда, даже если эти нарушения не сопровождались потерей трудоспособности.

Далее, в статье 140 УК РСФСР читаем:

«Те же нарушения, повлекшие за собой телесные повреждения или утерю трудоспособности (без указания срока утери), наказываются исправительными работами до года или (в зависимости от результатов нарушения) до трех лет лишения свободы».

И, наконец, третья, последняя, часть статьи 140 УК РСФСР гласит:

«Нарушения (перечисленные в части первой этой статьи), повлекшие за собой смерть человека или тяжкие телесные повреждения нескольких лиц, наказываются лишением свободы до пяти лет».

В этих случаях закон не допускает наказания в виде исправительно-трудовых работ. Лица, чья вина определена судом, наказываются в этих случаях только лишением свободы. Действующий УК РСФСР вступил в силу в 1976 г. В нем по сравнению с ранее действовавшими законами степень наказания усилена почти в два раза, а по третьей части этой статьи — даже больше.

Аналогичные статьи имеются в уголовных кодексах других союзных республик.

В ряде случаев электротравме сопутствует взрыв или пожар, что влечет за собой применение к нарушителям статей 214, 215, 216.

Статья 214 применяется к нарушителям правил разработки недр; статья 215 — при строительных работах, а статья 216 — при работах на взрывоопасных предприятиях или в цехах. Приведем статью 216:

«Нарушение производственно-технической дисциплины или правил, обеспечивающих безопасность производства на

взрывоопасных производствах или взрывоопасных цехах, наказывается исправительными работами на срок до одного года, или штрафом до ста рублей, или увольнением с должности. Те же действия, если они повлекли гибель людей или иные тяжкие последствия, наказываются лишением свободы на срок до семи лет».

Необходимо подчеркнуть, что этой статьей к преступлению относится нарушение производственно-технической дисциплины, даже если ничего трагического не случилось. Степень наказания при гибели людей повышена до семи лет.

Области применения статьи 140 и указанных статей 214, 215, 216, а также статей 106, 114 и 172 (эти три статьи рассматривают нарушения, связанные с халатностью, неосторожностью действий лиц, эксплуатирующих оборудование, или с превышением должностным лицом своих обязанностей) определяются следственными органами и в конечном итоге судом на основе изучения нарушений специализированных правил и договорных обязательств по электроснабжению.

Система мер по охране труда. Снижение травматизма обеспечивается не только законом. Оно достигается также выполнением общетрудовых и социальных требований, льготами при работах в особо опасных помещениях, регламентацией сверхурочных работ, соблюдением трудовой дисциплины, запрещением работы женщин и подростков на ряде производств, обеспечением работающих прозодеждой и спецодеждой, соблюдением графиков выходных дней и очередных отпусков.

Неуклонное выполнение должностными лицами своих обязанностей по охране труда и технике безопасности — эффективное средство в борьбе за снижение производственного травматизма и профессиональных заболеваний.

16.2. Ответственность и виновность

Существующая в социалистическом государстве система законодательной охраны труда предусматривает широкое ознакомление работающих с законоположениями, охраняющими их жизнь, здоровье и трудоспособность. Большую роль в этом ознакомлении играют выпускаемые издательством «Юридическая литература» «Комментарии к Уголовному кодексу» [31], которые обобщают опыт и труд большого коллектива юристов — теоретиков и практиков. Они, несомненно, помогают суду в оценке виновности лиц, привлекаемых к ответственности за нарушения правил техники безопасности, особенно сложной при рассмотрении случаев элек-

тротравм. Но число нарушений правил эксплуатации электрооборудования и электробезопасности, приведших к тяжелым последствиям, сравнительно с числом нарушений, например, автодорожных правил или правил техники безопасности на строительстве весьма невелико. Многим судьям годами не приходится рассматривать дела о привлечении к ответственности лиц, виновных в электротравмах. Это иногда порождает ошибочные решения судов первой инстанции в определении ответственности, а следовательно, и виновности нарушителей правил электробезопасности.

Трудности, возникающие при экспертизе. Ошибочные решения возникают, как правило, тогда, когда техническая экспертиза проведена недостаточно обстоятельно, неправильно скомплектована, в частности без привлечения инспектора технической инспекции профсоюза. Сложность экспертизы и в том, что до 30 % всех смертельных электротравм происходит без каких-либо внешних поражений тела пострадавшего и судебно-медицинскому эксперту, не имеющему возможности произвести микроскопическое исследование головного мозга в первые часы после смерти, приходится давать заключение, опираясь в значительной степени на технические обстоятельства происшествия.

Вскрытия, произведенные с опозданием, не обнаруживают, как правило, различий между смертью от поражения электрическим током и смертями от удушья, внезапного шока и всех тех воздействий, которые опосредуются через центры управления системами внешнего дыхания и кровообращения. Именно это и порождает трудности: клетки центральной нервной системы, лишенные питания, крайне быстро разрушаются, в результате чего специфика причин поражения теряется. Микроскопическое исследование, проведенное специалистами позднее, чем через четыре часа после смерти, малоинформативно для диагностики электротравм. «Обстоятельства вскрытия не противоречат обстоятельствам происшествия», — так формулируют свое заключение о причинах смерти даже очень крупные судебно-медицинские эксперты. Электротравму как причину гибели человека можно выявить с достоверностью только по результатам технической экспертизы, проведенной сразу после гибели пострадавшего и притом одновременно с судебно-медицинской экспертизой, выполненной в наиболее короткие сроки.

Но не только в этом состоит трудность оценки виновности нарушителей. Далеко не просто установить должностное лицо, которое своими действиями или бездействием допустило то нарушение правил эксплуатации электрооборудования или

правил электробезопасности, которое привело к возникновению смертельной электротравмы или электротравмы, сопровождавшейся тяжкими последствиями для пострадавшего.

Опирайтесь на законодательство! Перечисленные трудности приводят к ошибкам, не позволяющим с необходимой эффективностью использовать уголовное и трудовое законодательство для улучшения профилактических, технических и организационных мероприятий. Вот почему широкое ознакомление лиц электропрофессий с уголовным и трудовым законодательством, в первую очередь со статьей 140 УК РСФСР и соответствующими статьями других республиканских уголовных кодексов, со специализированными статьями, относящимися к строительству, добыче недр и т. д., совершенно необходимо и весьма полезно.

Для установления объективных причин происшествия, а также для выявления лиц, ответственных за выполнение правил охраны труда, требуется знание правил технической эксплуатации электрооборудования и правил техники безопасности, инструктивных указаний по санитарии и гигиене, отраслевых и ведомственных правил, например связанных с использованием установок с проникающей радиацией или с работой во взрыво- и пожароопасных помещениях, и, наконец, правил допуска к работам женщин, подростков и инвалидов. Подобные правила устанавливаются и утверждаются решениями Правительства и ВЦСПС, а в ряде случаев утверждение правил производят ЦК профсоюзов и главные управления соответствующих ведомств.

Круг должностных лиц. Задачей судебного расследования является, помимо выяснения обстоятельств происшествия, еще и установление должностного лица, по вине которого не выполнены правила, нарушение которых причинно связано с электротравмой или с возможностью появления таковой у одного или нескольких человек. Согласно «Комментариям» [31] круг должностных лиц, имеющих отношение к статье 140, весьма широк:

«Должностные лица занимают в государственных или общественных организациях, учреждениях или на предприятиях должности, связанные с осуществлением организационно-распределительных или административно-хозяйственных функций, которые выражаются в организации производственных процессов, в управлении людьми, занятыми в производстве, в распоряжении материальными ценностями и в контроле за их использованием».

В тех же «Комментариях» приводится перечень работающих, на которых не распространяется ответственность по

статьям о должностных преступлениях. В первую очередь это — рабочие, пусть даже очень высокой квалификации. Обобщая, можно сказать, что ответственность за обеспечение правил по охране труда и технике безопасности не несут лица, выполняющие непосредственные производственные операции. Применительно к электропрофессиям это — электромонтеры, электрослесари, помощники сменных дежурных, помощники начальников смен на электростанциях и подстанциях, обходчики линий электропередачи и рабочие ремонтно-аварийных служб, если они не выполняют обязанностей бригадиров и не являются начальниками агрегатов. Если кто-нибудь из перечисленных лиц совершит злоупотребление, возможно только вследствие того, что оно исполняет обязанности, не предусмотренные должностной инструкцией, то его можно рассматривать лишь как соучастника должностного преступления. Характер исполняемых обязанностей является критерием для отграничения должностных лиц от рядовых работников.

Если допущенное нарушение не создало реальной опасности для жизни и здоровья людей, работающих на данном предприятии, но повлекло за собой уничтожение или повреждение оборудования или строений, порчу сырья или готовой продукции, причинившие существенный материальный ущерб или повлекшие за собой срыв технологического процесса, то вступает в действие статья 172 УК РСФСР. Эта статья, носящая название «Халатность», гласит:

«Невыполнение или ненадлежащее выполнение должностным лицом своих обязанностей, небрежное или недобросовестное к ним отношение, причинившее существенный вред государственным или общественным интересам либо охраняемым законом правам или интересам граждан, наказываются лишением свободы на срок до трех лет или исправительными работами до одного года, или увольнением от должности».

Согласно «Комментариям» под должностным лицом в статье 172 понимаются люди, «постоянно или временно осуществляющие функции представителей власти, а также занимающие постоянно или временно в государственных или общественных учреждениях, организациях или на предприятиях должности, связанные с выполнением организационно-распределительных или административно-хозяйственных обязанностей или выполняющие подобные обязанности по специальному полномочию». Это определение не противоречит ранее приведенному, но детализация в определении полезна.

Внимание, уделяемое в «Комментариях к УК РСФСР» определениям должностного лица, имеет большое значение.

показывающее необходимость четкой регламентации обязанностей, продуманного составления должностных инструкций.

Ответственность рядовых исполнителей. Сказанное об ответственности должностных лиц отнюдь не означает, что рабочие, сознательно допускающие нарушение действующих правил охраны труда и санитарно-гигиенических норм, остаются безнаказанными. Рядовые работники, в том числе и представители перечисленных электропрофессий, а также посторонние предприятию или учреждению люди, нарушившие правила охраны труда и техники безопасности, несут (в соответствии с характером нарушения и вызванными последствиями) ответственность за умышленное убийство или телесные повреждения, за уничтожение или повреждение по неосторожности государственного или общественного имущества. При установлении судом виновности лиц, совершивших перечисленные деяния, они наказываются в соответствии с содеянным в объеме, предусмотренном общими статьями Уголовного кодекса, не связанными непосредственно с охраной труда. Исключением является нарушение правил техники безопасности в строительстве.

Правовые обязанности преподавателей технических учебных заведений. Недостаточное знакомство с законодательством об охране труда приводило к тому, что в недалеком прошлом многие преподаватели, приступая к занятиям в лабораториях или мастерских, не проверяли состояния защитных средств; они полагали, что эта проверка входит в обязанности либо заведующего лабораторией или мастерской, либо лаборанта, либо, наконец, лиц, особо назначенных в качестве ответственных за технику безопасности. Между тем преподаватели, даже временно выполняющие обязанности в период отпусков или при приеме экзаменов, являются в часы проведения занятий должностными лицами и на них полностью распространяется ответственность, предусмотренная статьями 140 и 172 УК РСФСР.

Значительное снижение электротравматизма учащихся, о чем свидетельствуют данные анализа его за 1980 г., показывает, что печальный опыт прошлых лет правильно воспринят и руководство учебных заведений приняло меры к повышению ответственности преподавателей за охрану труда в период проведения занятий с учащимися. Но сказать, что возможности улучшения охраны труда в учебных заведениях уже полностью использованы, никоим образом нельзя.

Квалификация преступления. Вернемся к рассмотрению второй и третьей частей статьи 140. Второй частью статьи квалифицируется нарушение правил охраны труда при отяг-

чающих обстоятельствах, когда действие или бездействие ответственных лиц повлекло за собой телесные повреждения или утрату трудоспособности (частичную или полную) кого-либо из работников данного предприятия или из иных лиц, связанных с этим предприятием по работе. Часть вторая статьи 140 предусматривает наказание виновного за причиненные тяжкие телесные повреждения. В зависимости от обстоятельств должностному лицу может одновременно предъявляться обвинение по статье 108 УК за нанесение тяжкого повреждения одному лицу либо менее тяжкого (по статье 109 УК) или легкого (по статье 112) одному или нескольким лицам. По части третьей статьи 140 квалифицируются нарушения правил охраны труда при особо отягчающих обстоятельствах, когда действия должностных лиц повлекли за собой смерть хотя бы одного человека или нанесли тяжкие телесные повреждения нескольким лицам.

Установление причинной связи. Во всех случаях для применения частей второй и третьей статьи 140 требуется установить причинную связь между допущенным нарушением правил охраны труда и наступившими последствиями. Установление этой связи при электротравмах зачастую бывает нелегким делом. Основная причина все та же — отсутствие четкого представления о том, какие именно параметры электрической цепи вызывают тот или иной исход. При определении степени виновности, а следовательно, и характера наказания следует учитывать, знал ли виновный о возможных последствиях нарушения им правил или не знал, мог ли он предвидеть эти последствия или не мог, или же легкомысленно рассчитывал, что «авось сойдет». Предварительное следствие и судебное расследование должны установить, имела ли место преступная самонадеянность или преступная халатность.

Весьма часты электротравмы, происходящие в результате нарушения правил техники безопасности самим потерпевшим. Задача экспертов установить, сделаны ли потерпевшим нарушения исключительно по его вине или же они вызваны и виной должностного лица, не проводившего инструктажа, предусмотренного правилами техники безопасности, не наладившего контроля за режимом работы электрооборудования, не обеспечившего наличия защитных средств на месте происшествия и т. д.

Из сказанного вытекает, что даже прямая вина потерпевшего не исключает ответственности должностного лица. Но прямая вина потерпевшего служит смягчающим обстоятельством при оценке степени вины должностного лица. Если же

причиной электротравмы на производстве явилась грубая небрежность потерпевшего, нарушившего даже элементарные требования безопасности, включая предупреждение должностного лица, принявшего все положенные меры по обеспечению безопасности, о недопустимости работы в возникших условиях, должностное лицо не подлежит уголовной ответственности. Обстоятельством, отягчающим вину потерпевшего, является состояние даже легкого опьянения, устанавливаемое в первую очередь судебно-медицинским экспертом.

Пример 16.1. В одной из лабораторий электротехнического профиля в начале занятий произошла смертельная электротравма. Обстоятельства ее таковы. В схеме одной из лабораторных работ одним из основных элементов был высоковольтный конденсатор, электрическая емкость которого составляла миллифарады. В процессе проведения работ он оказывался под напряжением; остаточный заряд конденсатора полагалось согласно инструкции «снимать» специальным заземляющим приспособлением, но это не было выполнено. Приступивший к работе студент из следующей группы знал, что заряда на конденсаторе не должно быть. В результате при касании к изолированным зажимам он был смертельно поражен током. Уголовное дело было возбуждено против преподавателя, ведущего занятия, как не обеспечившего достаточный инструктаж перед началом занятий, и заведующего лабораторией, как разделяющего ответственность за существенные недостатки в инструкции по проведению лабораторной работы. Недостатки заключались в том, что в инструкции не было указано, что по окончании работы заземляющее приспособление не должно сниматься с конденсатора, и не было указания о необходимости проверки остаточного напряжения на зажимах конденсатора. Учитывая уникальность травмы и безупречные характеристики подсудимых, суд ограничился условным наказанием с правом снятия судимости при отсутствии каких-либо нарушений правил техники безопасности в течение года.

Пример 16.2. Группа учеников старших классов решила применить «электрический» метод испытания способности переносить боль. Им было известно, что порог безопасности электрического тока составляет 100 мА. Знали, что электрическое сопротивление тела человека принимают равным 1000 Ом. Исходя из этих, в лучшем случае спорных, а правильное, явно ошибочных положений, что является из ранее проведенного анализа, «заводили» подсчитали, что если 15—20 человек, взявшись последовательно за руки, образуют электрическую цепь, то электрическое сопротивление будет таково, что при 220 В в цепи возникнет ток, во много меньший 100 мА. При этом действие возникающего тока ограничится «раздражением», перенесение которого и может характеризовать мужество и выносливость. В этой цепи двое крайних должны были вставить гвозди в розетку 220 В. Метод проверяли одновременно в цепи из 15—20 человек. Все обошлось благополучно. Однако один из подобных сеансов окончился трагически. Один из подростков в момент образования

электрической цепи погиб. К суду были привлечены классный руководитель и преподаватель физики. Учитывая безупречную работу обоих, нечеткость руководящих документов в обосновании значения «опасного тока», суд ограничился условным наказанием с правом снятия судимости через год и специальным решением в адрес энергонадзора.

16.3. Контроль и надзор за выполнением правил техники безопасности и санитарно-гигиенических норм

Юридическая литература, к сожалению, не дает однозначного толкования понятий «контроль» и «надзор», хотя их разграничение важно для определения ответственности за нарушение правил. Несомненно одно: надежная эксплуатация электрооборудования, неуклонное выполнение правил электробезопасности при конструировании и эксплуатации электрооборудования исключают вероятность появления электротравм.

Необходимость строгого контроля за деятельностью персонала предусмотрена «Основами законодательства в СССР», статья 104 которых гласит:

«Надзор и контроль за соблюдением законодательства о труде и правил по охране труда осуществляют:

1) специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции, не зависящие в своей деятельности от администрации предприятий, учреждений, организаций и их вышестоящих органов;

2) профессиональные союзы, а также состоящие в их ведении техническая и правовая инспекции труда — согласно положениям об этих инспекциях, утверждаемым ВЦСПС.

Советы народных депутатов и их исполнительные и распорядительные органы осуществляют контроль за соблюдением законодательства о труде в порядке, предусмотренном законодательством Союза ССР и союзных республик.

Министерства и ведомства осуществляют внутриведомственный контроль за соблюдением законодательства о труде в отношении подчиненных им предприятий, учреждений, организаций.

Высший надзор за точным исполнением законов о труде всеми министерствами и ведомствами, предприятиями, учреждениями, организациями и их должностными лицами возлагается на Генерального прокурора СССР».

Надзор за выполнением правил эксплуатации электро-технического оборудования осуществляют: а) энергетики предприятий, управлений, министерств и ведомств; б) орга-

ны государственного энергонадзора; в) специализированные научно-исследовательские институты.

И, наконец, в полном соответствии с основами законодательства о труде государственный надзор поручен техническим инспекторам профсоюзов.

Технический инспектор профсоюза может запретить производство работ, если выявляет те или иные нарушения по охране труда. Он имеет право наложить персональный штраф на виновников нарушений. Участвуя в расследовании несчастных случаев, он принимает решение о мерах наказания административного персонала или о передаче дела в судебные органы для привлечения виновных к уголовной ответственности.

Подчеркнем еще раз — эффективное выполнение правил обусловлено четким разграничением ответственности. Она предусмотрена правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилами техники безопасности, объединенными в один документ. Пункт Б главы II-3 этих Правил [60] устанавливает ответственность за безопасность работ. Напомним, что ответственными за эксплуатацию и безопасность обслуживания всех электроустановок и электросетей предприятия являются главный энергетик и начальник электроцеха. Именно они обязаны своими действиями обеспечить надежную, экономичную и безопасную работу электроустановок.

Ответственными за безопасность работ являются:

а) лицо, выдающее наряд (подразумевается наряд на производство электротехнических работ.— В. М.) и отдающее распоряжение;

б) лицо, допускающее к работам на подстанциях, в распределительных пунктах, кабельных и воздушных линиях оперативный и оперативно-ремонтный персонал (к оперативно-ремонтному персоналу относится ремонтный персонал, специально обученный и подготовленный для выполнения оперативной работы на закрепленных за ним электроустановках.— В. М.);

в) производитель работ или наблюдающий;

г) члены бригады.

Таким образом, выполнять электротехнические правила обязаны все, но основная ответственность возложена на человека, организующего работу, выдающего соответствующий наряд и контролирующего выполнение правил.

Лицо, выдающее наряд и отдающее распоряжение, устанавливает необходимость работы, отвечает за безопасное ее выполнение, определяет численный состав бригады и доста-

точность квалификации назначаемого им допускающего, а также производителя работ или наблюдающего и членов бригады. Право выдачи наряда предоставляется лицам административно-технического персонала (главный инженер предприятия и его заместитель, начальник и заместитель начальника района, службы, участка, цеха, отдела, подстанции, инженер, мастер).

Далее в Правилах указывается, какими данными должен обладать человек, выдающий наряд, и об ответственности производителя работ.

В соответствии с этими Правилами производитель работ отвечает за правильность подготовки рабочего места, за выполнение необходимых для производства работ мер безопасности, за применение правильных и безопасных методов работы, за исправное состояние инструмента и защитных средств, за соблюдение правил им самим и членами его бригады.

При наличии напряжения на установке или вблизи установки, находящейся под напряжением, производитель работ обязан иметь по меньшей мере IV квалификационную группу по технике безопасности. Такая группа присваивается лицам, имеющим образование не ниже техникума или приравненного к нему учебного заведения. В Правилах подробно перечисляются обязанности допускающего и наблюдающего. В рассматриваемом нами аспекте проблемы электробезопасности особенно важно то обстоятельство, что должностным лицом, которое может быть привлечено к уголовной ответственности, является лицо из административно-технического персонала до мастера включительно.

16.4. Роль технической экспертизы при расследовании сложных электротравм

Техническая экспертиза назначается прокурором. Право требовать ее имеют также обвиняемый и суд. После проведения инструментального анализа, описанного в главе четвертой, эксперт должен: а) установить, допущены ли нарушения ПТЭ и ПТБ и других директивных документов, и б) определить должностных лиц — виновников этих нарушений.

Приведем примеры, показывающие, насколько сложно бывает подчас решить вопрос о том, кого именно надлежит привлечь к уголовной ответственности за нарушение правил безопасности, вызвавшее гибель людей или тяжелые телесные повреждения.

Пример 16.3. На обувной фабрике вводился в эксплуатацию новый цех с автоматическим конвейером. В этом цехе надо было «зажелезнить» пол. Специалистов этого профиля на фабрике не было. Главный инженер фабрики обратился за помощью к своему приятелю — руководителю строительного-монтажной организации. Тот, получив письмо, адресованное ему администрацией фабрики, наложил на него резолюцию, содержащую распоряжение начальнику одного из подчиненных ему строительных участков о выделении на неделю трех рабочих для помощи фабрике в вечернее время, с оплатой их работы за это время фабрикой. Начальник участка оформил откомандирование так: «Рабочие К., В. и С. с 15 ч дня направляются в распоряжение начальника управления для выполнения работ на обувной фабрике». Начальник строительного-монтажного управления санкционировал приказ, после чего вызвал рабочих к себе и сообщил им: «Товарищи, надо помочь обувщикам, отправляйтесь на фабрику, вам расскажут, что надо сделать». Появившиеся на фабрике рабочие были приняты главным инженером. Тот лично привел их в цех, показал, где им предстоит работать. Никакого оформления на работу, кроме выдачи временных пропусков для входа на фабрику, по существу, не было. Строительно-монтажная организация не выдала рабочим командировочных документов, а администрация фабрики не провела инструктажа на месте работ и не передала рабочих в подчинение какому-либо фабричному подразделению.

Придя в цех, рабочие обратились к начальнику цеха с просьбой осветить помещение, в котором им предстояло работать. Тот отдал распоряжение монтеру цеха, и по «временке» свет был подан. На третий или четвертый день монтер решил подать напряжение по новой линии, идущей вдоль конвейера и еще не принятой в эксплуатацию. Сразу же один из рабочих сообщил, что при соприкосновении с трубой, в которой проложены питающие провода, «бьет током». Монтер со щитка проверил изоляцию провода относительно земли. Измерения показали, что сопротивление изоляции равнялось 10 МОм. Попробовав затем при том же включении сети рукой трубу, при прикосновении к которой рабочий почувствовал удар током, он ничего не обнаружил. (На следствии выяснилось, что монтер при проверке был в галошах.) Сказав после проверки рабочим: «Все в порядке. Можете работать», он подал напряжение. Через 40 мин, производя на коленях железнение пола непосредственно у конвейера, рабочий С. коснулся щекой металлической незаземленной трубы, получил удар током и погиб. Оказалось, что труба на этом участке была смонтирована на сухой деревянной доске и не была заземлена (не успели), а при протягивании провода была повреждена изоляция и имело место металлическое соприкосновение провода с трубой. Монтаж незаземленной трубы на деревянной доске объясняет высокое значение сопротивления изоляции, полученное при измерении.

Возник вопрос: кого привлекать к уголовной ответственности? Начальник цеха обувной фабрики предъявил письменное распоряжение, запрещающее подачу напряжения на не принятую в эксплуатацию электросеть. Монтер фабрики за месяц до происшествия был ознакомлен с этим распоряжением и расписался на нем. Впрочем, он

и сам не отрицал своей вины и был крайне подавлен известием о гибели человека. Описывая свои действия, монтер уверял, что мысль о возможности появления напряжения на трубе после того, как он проверил со щитка сопротивление изоляции провода относительно земли мегомметром и опробовал трубу рукой, даже не могла прийти ему в голову. Следовательно хотел было привлечь монтера к ответственности, но оказалось, что тот имеет лишь третий профессиональный разряд и только III квалификационную группу по технике безопасности, поэтому не может рассматриваться как лицо, уголовно ответственное за происшедшее несчастье. Да и допрос его показал, что по уровню своих знаний он не мог выявить и оценить опасность (речь идет об отсутствии заземления трубы, в которой был проложен питающий кабель). Для этого требовалась проверка вводимого в действие участка сети более квалифицированным работником. Монтер получил административное взыскание и был понижен в должности.

Следователь долго и внимательно изучал обстоятельства дела и пришел к убеждению, что ответственность и юридическую и моральную за гибель рабочего несет начальник строительно-монтажного управления, а разделяет ее также и юридически и морально главный инженер фабрики. Вина начальника строительно-монтажного управления юридически заключается в том, что он нарушил правила откомандирования работников, не выделил должностного лица (бригадира) для инструктажа и контроля их работы, не проинструктировал их сам, не снабдил требуемым в данном случае командировочным предписанием. Вина главного инженера фабрики состоит в том, что он, несмотря на явные нарушения установленного порядка (отсутствие командировочных предписаний), должен был выполнить, но не выполнил правил использования прикомандированного персонала. В данном случае он должен был передать рабочих в распоряжение начальника какого-либо подразделения фабрики, имеющего отношение к работе в цехе, или, на худой конец, должен был, приведя рабочих в цех, лично проинструктировать их, указав на действующее и недействующее оборудование, сообщить фамилию лица, например начальника цеха, к которому рабочим следовало обращаться при каких-либо неполадках. Начальник цеха, получив сигнал о том, что «бьет током», без сомнения, не допустил бы использования не принятой в эксплуатацию сети для питания временного освещения. В результате всех этих, казалось бы, формальных нарушений правил произошла трагедия, погиб человек и «получили срок» в общем-то неплохие руководители.

Пример 16.4. На кирпичном заводе в одном из небольших украинских городов строился новый сушильно-размолочный цех на территории, непосредственно примыкающей к действующему заводу. Стройплощадка не имела ограждения. Сторожевая охрана ее осуществлялась только ночью. В процессе строительных работ на стройплощадке в рабочее время производились сварочные работы. Сварочный аппарат получал электроэнергию от воздушной линии передачи 380/220 В. Сварочный аппарат находился в 15 м от линии передачи. От нее через рубильник, расположенный на столбе, начинался кабельный ввод к распределительному щиту. На щите были размещены

приборы учета и автомат, подключенный к кабелю, идущему на сварочный агрегат (рис. 16.1).

Рубильник на столбе не имел исправного защитного кожуха. Клеммная коробка не была заперта. Линия передачи и кабельное подключение к сварочному трансформатору были сооружены персоналом завода без разрешения инспекции энергоснабжения. Техническая документация отсутствовала. Сварочный аппарат не имел ограждения.

В субботу, после окончания работ, рубильник на столбе и автомат распределительного щита были, по словам сварщика и бригадира участка, отключены, сварочный аппарат не находился под напряжением. На следующий день, в воскресенье, в 18 ч на стройплощадку проникли двое мальчиков. Один из них поднял незапертую крышку клеммной коробки, а второй коснулся рукой клемм. Клеммы оказались под напряжением, и мальчик погиб.

Следственные органы привлекли к судебной ответственности начальника участка стройуправления 3. Тот своей вины не признал. Технический инспектор профсоюза с ведома и согласия прокурора уклонился от экспертизы, заявив, что несчастный случай произошел в нерабочее время и не был связан с производством работ. Но суд,

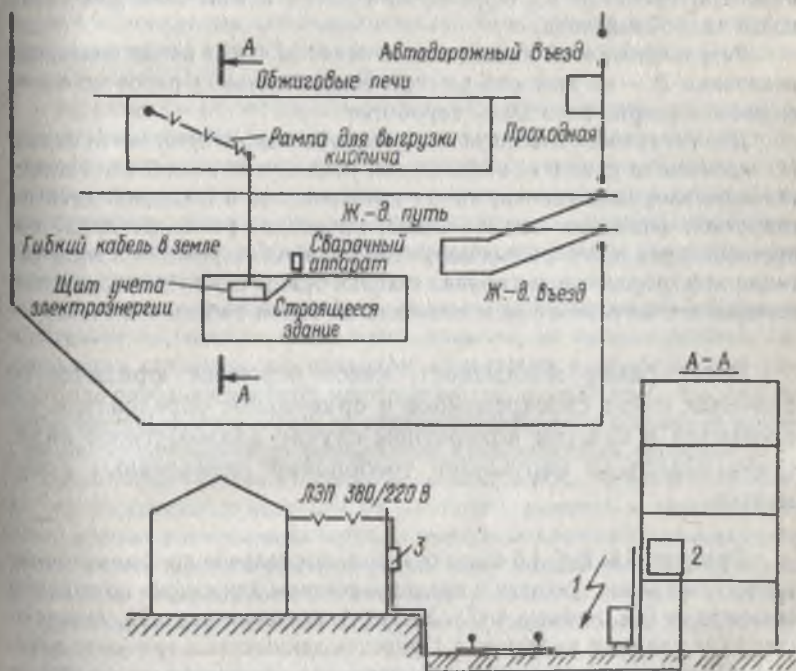


Рис. 16.1. Электрическая сеть и оборудование на месте гибели мальчика у сварочного трансформатора
1 — место гибели мальчика; 2 — сварочный трансформатор; 3 — распределительный щит в строящемся здании

основываясь на статье УК, предусматривающей наказание должностного лица за сам факт нарушения правил, особенно, если это нарушение привело к смертельному исходу, приговорил З. к четырем годам лишения свободы. Подсудимый обжаловал это решение. Состоялось новое судебное разбирательство, закончившееся осуждением подсудимого теперь уже на три года лишения свободы. Последовала еще одна кассационная жалоба.

Осужденный писал в ней, что судебная коллегия по уголовным делам областного суда, отменив приговор народного суда, указала на ряд упущений в разбирательстве дела, но они не были исправлены ни во время дополнительного следствия, ни при повторном рассмотрении дела народным судом. Так, не было доказано, что ответственность за случившееся несет именно он, З., которому подчинено девять строительных площадок, находящихся на разных предприятиях района, и который к тому же не имеет квалификационной группы по электробезопасности, тогда как лица из персонала стройуправления завода, работающие непосредственно на месте происшествия и имеющие упомянутую квалификационную группу (главный энергетик стройуправления А., мастер участка К., электрик Б., сварщик Г.), к ответственности привлечены не были.

Не выявлены и не пойманы злоумышленники, которые, как надо полагать, проникли на территорию участка и включили для своих целей сварочный аппарат.

Результатом этой кассационной жалобы было новое смягчение наказания З.— на этот раз до года исправительных работ по месту службы с удержанием 20 % заработка.

Дело тянулось более двух лет и закончилось, по сути, почти ничем. Не схвачены за руки и не наказаны ни упомянутые в кассации гипотетические злоумышленники, якобы выполнявшие в выходной день на сварочном аппарате «левый» заказ, ни вполне реальные лица, допустившие ряд неоспоримых нарушений правил устройства и эксплуатации электроустановок и правил техники безопасности — нарушений, которые в конечном счете и повлекли за собой гибель мальчика.

Этот пример показывает, какое огромное юридическое значение имеет своевременное и правильное определение экспертизой в каждом конкретном случае должностного лица, отвечающего за нарушение требований директивных документов.

Пример 16.5. В § 4.5 было описано смертельное поражение электрическим током студентки в предназначенном для стирки помещении общежития (см. пример 4.17). Эксперты выявили ряд лиц, отвечающих за те или иные нарушения. Приведем заключительную часть акта.

«По мнению технической экспертизы, за нарушение эксплуатации стиральной машины несут ответственность:

а) проректор по АХР, не осуществивший действенного контроля за работой подчиненных ему должностных лиц по охране труда, чем допустил длительную эксплуатацию стиральных машин в опасных

условиях (нарушен п. 4 раздела III Положения об организации работ по охране труда в вузах — приказ МВССО СССР № 2-6-31-0763);

б) начальник отдела охраны труда, не организовавший проверку обучения персонала АХЧ вопросам охраны труда и не разработавший мероприятий по предупреждению несчастных случаев в общежитии (нарушен приказ № 246 МВССО об инженерере по ТБ учебных заведений);

в) декан факультета, где обучалась студентка, поскольку он не принял мер по предотвращению нарушений правил эксплуатации стиральных машин, хотя знал о том, что такие нарушения были;

г) главный энергетик института, не обеспечивший общежитие плакатами, инструкциями и другими наглядными пособиями по электробезопасности при эксплуатации электробытового оборудования студентами и персоналом института и не выделивший должностного лица из числа электротехнического персонала (нарушение п. 9 Временного типового положения о студгородках, утвержденного МВССО УССР 25.09.75 г.);

д) директор студгородка института, не принявший всех мер для обеспечения безопасной эксплуатации стиральных машин в постирочных помещениях, не обеспечивший контроль за работой служб эксплуатации студгородка, хотя ему было известно, что изоляция электростиральных машин неисправна, поскольку поступали жалобы на то, что «бьет током» (не выполнены пп. 6 и 7 должностной инструкции студгородка и ч. VI-9 Временного типового положения о студгородках МВССО УССР от 25.08.75 г.);

е) инженер по эксплуатации зданий и сооружений студгородка, не организовавший безопасность эксплуатации стиральных машин, находящихся длительное время в условиях повышенной влажности (слив воды происходил на пол, а рядом с машинами находились естественные заземлители — водопроводные и теплофикационные трубы, отсутствовала приточно-вытяжная вентиляция (нарушен приказ по институту);

ж) комендант общежития, формально сдававшая в ремонт и принимавшая из ремонта стиральные машины, не производившая инструктажа студентов по правилам обращения с приборами и тем нарушившая должностную инструкцию, но в силу того, что она не была обучена и аттестована по электробезопасности, степень ее ответственности должна быть установлена следственными органами;

з) мастер участка стиральных машин завода «Рембыттехника», не осуществлявший контроля за качеством ремонта и технического обслуживания стиральных машин, не осуществлявший планомерного учета машин при их ремонте и тем нарушивший п. 20 положения о мастере, утвержденного директором завода, в котором сказано: «Совместно с работниками ОТК предупреждает брак и устраняет причины его».

Такое заключение экспертизы, попытавшейся разделить ответственность за гибель человека между большим числом должностных лиц, затруднило вынесение судебного решения. Суд поступил правильно, осудив лишь двух из числа упомянутых в акте лиц: главного энергетика и инженера, отвечающего за эксплуатацию зданий. На

остальных должностных лиц, упомянутых в акте, были по представлению суда наложены административные взыскания.

Пример 16.6. В радиотехнической лаборатории вуза студенты старшего курса проводили учебно-исследовательскую работу. Неожиданно студент, работавший на одной из установок, громко вскрикнул. Подбежавшие увидели, что он полулежит на столе, а рукой касается токоведущих деталей схемы. Несмотря на тотчас начатое искусственное дыхание, продолженное в машине «Скорой помощи», спасти пострадавшего не удалось. Следов поражения — электрометок не было. Автомат, подающий напряжение на установку, был отключен. И все-таки это была электротравма. Удалось установить, что пострадавший был поражен разрядом конденсатора, ранее находившегося под напряжением, которое не было снято.

Следственные органы вначале предъявили обвинение только заведующему лабораторией, но затем к ответственности был привлечен и преподаватель, проводивший занятия. В процессе судебного разбирательства, руководствуясь «Комментариями» [31] и разъяснениями, опубликованными в Бюллетене Верховного суда РСФСР (1971, № 2, с. 11), и учитывая ряд обстоятельств (редчайшее сочетание причин поражения; безупречные характеристики, выданные на лиц, имевших отношение к делу), а также то, что пострадавший сам грубо нарушил общие правила работы с открытыми схемами, суд ограничился условным наказанием заведующего лабораторией и доцента, проводившего занятия. Объективному и быстрому рассмотрению дела способствовали квалифицированное и обстоятельное показание свидетеля — технического эксперта и вдумчивое заключение судебно-медицинского эксперта.

Пример 16.7. В сборочном цеху авиационного завода происходила наладка аппаратуры системы управления. В системе использовалось напряжение 27 В, 400 Гц. Работа началась с проверки проводки. Оказалось, что не работает один из микродвигателей системы напряжением 27 В. Проверяя сеть, наладчик прощупывал рукой каждый проводочек, предполагая, что где-то в его электрической сети произошла поломка. Бригада наладчиков исходила из того, что напряжение 27 В безопасно, особенно при 400 Гц. Внезапно наладчик, ощупывающий цепь, вскрикнул с глубоким вздохом и затем замолчал, как будто чего-то испугавшись, а через некоторое время он упал. Принятые меры: искусственное дыхание, электростимуляция — не помогли. Он погиб. На теле при первичном осмотре ничего не было обнаружено. Впоследствии при судебно-медицинской экспертизе была обнаружена характерная электрометка — припухлость с точкой посередине. Результаты вскрытия показали, что наладчик погиб от «синей смерти» — поражения системы дыхания. На теле была обнаружена и двойная метка. Возник конфликт между судебным экспертом и эксплуатационным персоналом. Судебный эксперт настаивал на смерти от электротравмы, персонал утверждал, что 27 В — безопасное напряжение, руководствуясь существующими нормативными материалами.

30 лет после этого случая с указанной группой электроналадчиков электротравм не было.

Пример 16.8. Тania Ш., восьми лет, ученица третьего класса, стоя на влажной после ливневого дождя ступени подъезда дома № 11 по улице Желябова г. Ленинграда, при попытке привести в действие входное кодовое электромагнитное устройство была смертельно поражена электрическим током. Расследование этого события показало, что кодовое устройство по отношению к поверхности влажной ступени оказалось под напряжением 220 В. Девочка была в мокрых сандалиях, что послужило одной из причин образования электрической цепи через ее тело. Кодовое устройство кустарного изготовления было выполнено неизвестными людьми, которые, собрав деньги с жильцов этого подъезда, изготовили его с грубыми техническими нарушениями. Устройство состояло из блока логической схемы, расположенного на высоте 3,5 м от поверхности ступени, кнопочного устройства для подбора кода, его корпуса и металлической кнопки. Нарушения заключались в использовании напряжения 220 В, в то время как для этой цели правилами ПЭУ требовалось питание кнопочного устройства через промежуточный трансформатор 220/24 В. Планка кодового устройства и кнопка должны быть выполнены из изолирующего материала. В довершение нарушений один из проводов сети 220 В касался поверхности планки кодового устройства. Резко увеличивало опасность поражения человека электрическим током замена катушки 220 В на электромагнитную катушку 120 В, что резко снизило электрическое сопротивление цепи, в которой оказалась девочка.

Ответственность за смертельную электротравму несет человек, выполнивший кодовое устройство с грубыми нарушениями технических требований. Ответственность разделяет представитель Ленгоржилуправления за отсутствие контроля домового электрооборудования и его питающей электросети. Акт расследования данной электротравмы заканчивается рекомендациями: 1) взять на учет все электромеханические кодовые устройства в жилых домах г. Ленинграда; 2) проверить их на соответствие техническим требованиям и нормам; 3) изъять из обращения электромеханические замки, не соответствующие требованиям; 4) средствами массовой информации оповестить население о причинах несчастного случая и о запрещении допуска к электрооборудованию домовых и квартирных электросетей случайных лиц. К этому следовало добавить необходимость рассмотрения возможности организации в системах энергонадзора специальных отделов для контроля домовых и квартирных электросетей.

16.5. Достоверность ответственности

Одним из основных средств обеспечения безаварийной и безопасной работы электрооборудования являются результаты тщательного расследования причин и обстоятельств поражения человека электрическим током. Общая методология расследования приведена в начале книги. Материалы и выводы по материалам расследования позволяют выявить дефекты электрооборудования, недостатки его эксплуатации, эффективность защитных мероприятий, а также грубые на-

1. Абрамян В. К., Терян С. А., Баргесян Г. Г. Статическая электризация сыпучих материалов при их промышленной обработке. Ереван: Айастан, 1976.
2. Авдеев М. И. Курс судебной медицины. М.: Медицина, 1982.
3. Ажибаев К. А. Физиологические и патофизиологические механизмы поражения электрическим током. Фрунзе: Илим, 1977.
4. Аксенов М. Д., Манойлов В. Е., Пахомов А. Ф. Действие электрического тока на организм животных и человека в условиях повышенного давления // Исследование условий электробезопасности при подводных работах. Л.: ВНИИ охраны труда ВЦСПС (ЛИОТ), 1953.
5. Аркелян М. К., Вайнштейн Л. И. Электробезопасность в жилых зданиях. М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Арсланова Р. М., Манойлов В. Е., Ганелина И. Е. Геомагнитные влияния на рост сердечно-сосудистых заболеваний // Космическая биология и авиационно-космическая медицина. 1980. № 5. С. 35—42.
7. А. с. 914034 СССР. Способ определения степени термического поражения кожи человека / В. Е. Манойлов, К. М. Крылов, В. Е. Енученко, Г. И. Васильева // Открытия. Изобретения. 1982. № 11.
8. Бацеливич И. Э., Сидоров И. Ф. Анализ влияния переходных процессов на исход электротравм // Машины и механизмы горных работ. 1982. № 3. С. 13—15.
9. Беленький Л. С. Новые правила техники безопасности электроустановок // Энергетик. 1981. № 5. С. 41—42.
10. Билибин П. М., Кузнецов А. Н., Браворенко Н. И. Влияние постоянного магнитного поля на электрофизиологические параметры идентифицированных нейронов виноградной улитки // Биофизика. 1981. Т. 26. Вып. 5. С. 883.
11. Ведетьева Р. А. О влиянии судорожного припадка на тормозные механизмы сосудистых реакций // Журнал высшей нервной деятельности. 1962. № 5. С. 819—825.
12. Вигдорчик Н. А. Электрпатология. Л.: Ленингр. ин-т гигиены труда и профзаболеваний, 1940.
13. Вогралик В. Г., Вяземский Э. С. Очерк китайской медицины. М.; Л.: Медгиз, 1961.
14. Волков А. Н., Граве В. И. Выбор режима нейтрали для высоковольтных ЭЭС буровых судов // Судостроительная промышленность. Сер. Судовая электротехника и связь. М.: ЦНИИ «Румб». 1988. Вып. 6. С. 56—65.
15. Геков Л. Смертельный случай от индуцированного напряжения // Энергетика (на болг. яз.). 1972. № 11. С. 13—19.

16. Глазенап М. С., Манойлов В. Е., Тентер Ю. К. Методика расследования электротравм // Вопросы электропатологии, электро-
травматизма и электробезопасности. Т. 4—5. Фрунзе: Изд-во АН
Кирг. ССР. 1964. С. 57—61.

17. Глушков В. М. О возможных особенностях физических полей биосистем // Кибернетика. 1981. № 3. С. 105—108.

18. Гордон Г. Ю., Симин А. И., Филиппов В. И. Стандартизация требований электробезопасности // Вопросы электробезопасности в народном хозяйстве. М.: Профиздат. 1976. С. 451—455.

19. Гордон Г. Ю., Филиппов В. И. Анализ электротравматизма // Промышленная энергетика. 1982. № 8. С. 47—49.

20. Граве В. И., Сидельников В. В. Электротехнологические методы бумажного производства. Л.: Изд. ЛГИ, 1984.

21. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984.

22. Еллинек С. Несчастные случаи от электричества. М.: Вопросы труда, 1927.

23. Енученко В. А., Дмитриев Ю. И., Новиков А. Н. Метод и прибор инфракрасного зондирования ожогов // Измерительная техника, 1986. № 7. С. 52—53.

24. Защита от действия электромагнитных полей и электрического тока в промышленности: Сб. статей / Под ред. В. И. Филиппова и Ю. А. Морозова. М.: ВНИИ охраны труда ВЦСПС, 1973.

25. Ильина А. И., Теплов С. И. К механизму изменений электрокардиограммы при болевом раздражении // Физиологический журнал СССР имени И. М. Сеченова. 1958. № 8. С. 720—726.

26. Капустин А. А. Заземление как средство надежной работы приборов среды, пространства и биоинформации // Труды ЛИАП. 1966. Вып. 51. С. 47—50.

27. Квазиэлектростатическое воздействие на одиночный нейрон / И. Е. Михальцев, Т. Л. Дьяконова, П. И. Набохин и др.. Частотная модуляция активности и возбуждения // Биофизика. 1980. Т. 25. Вып. 6. С. 1027—1056. Следовые явления и сопоставление с внутриклеточным возбуждением // Биофизика. 1981. Т. 26. Вып. 5. С. 94—100.

28. Киселев А. П. Тело человека как элемент электрической цепи // Тр. МИИТ. 1966. Вып. 226. С. 51—62.

29. Князевский Б. А., Марусова Т. П., Чекалин Н. А. Охрана труда в электроустановках. М.: Энергия, 1973.

30. Козлов В. И. Указатель напряжения // ЛИАП им. М. И. Калинина. 1966. Вып. 51. С. 82—84.

31. Комментарии к Уголовному кодексу РСФСР. М.: Юридическая литература, 1974.

32. Копытов Ю. В., Вайнштейн Л. И. Борьба с электротравматизмом — задача большой важности // Промышленная энергетика. 1968. № 7. С. 2—4.

33. Корж Н. А. Заземление, токи в земле и электробезопасность. М.: Информэнерго, 1974.

34. Корж Н. А. О механизме электротравм // Промышленная энергетика. 1982. № 9. С. 61.

35. Корсунцев А. В., Покровская К. И. Методика расчета сопротивления заземления железобетонных фундаментов // Электрические станции. 1968. № 11. С. 63—68.

36. Крикунов М. Ф., Скворцов Ф. Ф. Случай смертельного поражения электрическим током напряжением 12 В // Вестник электропромышленности. 1957. № 4. С. 75—76.

37. Лебль О. Заземление, зануление, защита выключателями. Л.: М.: ОНИТИ, 1937.
38. Логинова Е. А. Очерки по истории борьбы с травматизмом в СССР. М.: Медгиз, 1958.
39. Манойлов В. Е. Авария с поражением людей от шаговых напряжений // Электричество, 1936, № 8.
40. Манойлов В. Е. Сопротивление заземления мест повреждения в сетях 380—220 В // Электрификация сельского хозяйства. 1936. № 3. С. 78—80.
41. Манойлов В. Е. Изолирующие полы как надежное средство электробезопасности // Промышленная энергетика. 1959. № 9. С. 17—20.
42. Манойлов В. Е. Проблемы электробезопасности. М.: Л.: Госэнергоиздат, 1961.
43. Манойлов В. Е. Исследование особенностей электропроводности тела человека // Электричество. 1963. № 11. С. 37—41. Дискуссия по этой статье // Электричество. 1965. № 5. С. 50—51.
44. Манойлов В. Е. Электричество и человек // Л.: Энергоатомиздат, 1983.
45. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности // Л.: Энергоатомиздат, 1983.
46. Манойлов В. Е. Гарантированная электробезопасность // Электричество. 1988. № 6.
47. Найфельд М. Р. Заземления и защитные меры безопасности. М.: Л.: Энергия, 1975.
48. Народное хозяйство в СССР в 1982 г.: Статистич. ежегодник. М.: Стандартиздат, 1983.
49. Насонов Д. Н., Розенталь Д. Л. Фактор времени при оценке возбудимости тканей // Физиологический журнал СССР им. И. М. Сеченова. 1963. № 4. С. 405—422.
50. Некоторые экологические эффекты действия постоянного электрического поля высокого напряжения / В. В. Антипин, Н. Н. Добров, В. Н. Дробышев и др. // Космическая биология и авиационно-космическая медицина. 1983. № 4. С. 50—55.
51. Несчастные случаи в электрических установках Швейцарии // Промышленная энергетика. 1957. № 7. С. 33—35; 1958. № 11. С. 31—33.
52. Ожоги: Руководство для врачей / Под ред. Б. С. Вихриева, В. М. Бурмистрова. Л.: Медицина, 1986.
53. Орлов А. Н., Саркисов М. А., Бубенко М. В. Электротравма. М.: Медицина, 1977.
54. Ослон Л. Б. О зависимости сопротивления заземления от размеров заземлителя // Электричество. 1964. № 1. С. 69—70.
55. Петрик Г. О. О применении ксилитовых полов в жилых домах // Промышленная энергетика. 1959. № 9. С. 22—23.
56. Познанская Н. Б. Ионная проницаемость человеческой кожи // Бюл. экспер. биологии и медицины. 1938. Вып. 2. № 6. С. 17—21.
57. Положение о расследовании и учете несчастных случаев на производстве. М.: Энергия, 1976.
58. Портнов Ф. Г. Электростимуляция и рефлексология. Рига: Зинатне, 1983.
59. Правила техники безопасности при эксплуатации и строительстве сооружений и устройств связи. М.: Энергия, 1978.
60. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. М.: Энергия, 1981. Правила технической эксплуатации

электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. Энергия, 1973.

61. **Рябова Т. Я.** Метрологические и нормативные аспекты диагностической биотелеметрии // Вопросы медицинской электроники: Межвуз. сб. Таганрог: РТИ. 1980. № 2. С. 78—81.

62. **Сазонова Т. Е., Морозов Ю. А.** Физиолого-гигиеническая оценка условий труда на ОРУ 220, 380 и 500 кВ // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат. 1969. Вып. 54. С. 34—39.

63. **Сант-Дьёрдьи А.** Биозлектроника: Пер. с англ. М.: Мир, 1971.

64. **Смуров А. А.** Токи высокого напряжения. М.: Вопросы труда. 1928.

65. **Солодовников Г. С.** Электробезопасность при работе на судах и под водой. Л.: Судостроение, 1971.

66. **Статическое электричество в химической промышленности** / Б. Г. Попов, В. Н. Веревкин, В. А. Бондарь, В. И. Горшков; Под ред. Б. И. Сажина. Л.: Химия, 1977.

67. **Строительные нормы и правила. СНиП III-И-6-67. Электротехнические устройства. Правила организации и производства работ.** М.: Стройиздат. 1968. СНиП 997-64 (с изменениями за 1971—1980 гг.). Указания по проектированию электрооборудования в жилых зданиях. М.: Стройиздат, 1983. С. 26.

68. **Табата Я.** Статическое электричество на теле человека: Пер. с яп. 88/20714. ГПНТБ.

69. **Теория и практика лечения ожогов:** Пер. с англ. / В. Рудовский, В. Назиловский, В. Зиткевич, К. Зинкевич. М.: Медицина, 1980.

70. **Техника безопасности и производственная санитария:** Сб. статей. М.: Атомиздат, 1970.

71. **Троицкая А. Д.** Электротравма кожи. Л.: Трансжелдориздат, 1947.

72. **Туркменов М. Т.** Принципы физиологического моделирования и результаты изучения некоторых угрожающих состояний в эксперименте. Фрунзе: Илим, 1976.

73. **Фрейдлин С. Я.** Профилактика травматизма и организация травматологической помощи. Л.: Медгиз, 1963.

74. **Фрейман И. Г.** Радиотехника. М.: Вопросы труда, 1927.

75. **Френкель Г. Л.** Современные вопросы электропатологии // Тр. конф. по электротравме. Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1957.

76. **Холодов Ю. А.** Реакция нервной системы на электромагнитные поля. М.: Наука, 1975.

77. **Хорват Т., Берта И.** Нейтрализация статического электричества: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.

78. **Цапенко Е. Ф.** Контроль изоляции в сетях до 1000 В. М.: Энергия, 1972.

79. **Чекалин Н. А., Полухин Г. И., Тушин Г. Г.** Охрана труда в электротехнической промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1983.

80. **Чижевский В. Л.** Земное эхо магнитных бурь. М.: Наука, 1976.

81. **Чиколев В. Н.** Избранные труды по электротехнике, светотехнике и прожекторной технике. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949.

82. **Шуцкий В. И., Бурлаков А. А.** О вероятности оценки уровня электробезопасности // Электричество. 1982. № 2. С. 17—19.

83. **Якобс А. И., Луковников А. В.** Электротравматизм в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1981.

84. **Adey W. R., Bowin S. M.** Neuroscience research program // Bull. 1977. № 15/7.

85. **Antoni W.** Wirkungen des elektrischen Stroms auf die Grundprozesse der Erregung im Herzen // Bull. Schweiz. Akad. med. Wiss. Basel. 1975. № 31. S. 17—32.

86. **Arbeitsunfälle** und Berufskrankh. Elektr. // Bull. Int. Sek. IVSS. 1972. № 1.

87. **Bewertung** von Spannungsschwankungen bei Unfällen in Gleichspannungsnetzen // J. Kupfer, W. Ledey, A. Nikodym, D. Schirmag, M. Sedlatzek // Der Elektro-Praktiker. Berlin. 1980. Bd. 34. № 5. S. 167—170.

88. **Burnett J.** Protection against electric shock // Journ. of IEE. 1982. Vol. 10.

89. **Class H.** Unfälle in elektrischen Starkstromanlagen in Jahren 1969—1971 // El. Revue Suisse. 1973. № 31.

90. **Committee report**, voltage gradients through the ground under fault conditions // Trans. AIEE. Power. Appar. and Systems. 1985. № 38. P. 669—685. Discussion. P. 685—695.

91. **Dalziel C. F., Lee W. R.** Reevaluation of Lethal electric currents. Discussion // IEEE Transactions on Industry and General Applications. ICA-4. 1968. № 6. P. 676—677.

92. **Elektrische Unfälle** // Elektrotechnische Arch. Ausgabe 3. H. 3. März 1956. № 21. S. 91—93. 1971. № 17. S. 51—52. 1972. № 2. S. 25—27.

93. **Fandlhofer F.** Sicherheits Technik in Elektrischen Anlagen // Elektrotechnische Arch. 1973. S. 16—18.

94. **Ferris L. D., King B. G., Spens P. W.** Effect of electric shock on the heart // El. Eng. 1936. Vol. 55. P. 498. Trans. AIEE. 1936. Vol. 6. P. 498—515.

95. **Freiberger H.** Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom. Berlin: 1934.

96. **Gibbert T. C.** How low is a safe voltage? // El. Rev. 1956. № 21. P. 887—889.

97. **Gildemeister M.** Österr. Radio- und Elektrogewerbe. 1958. № 15. S. 16, 17, 19.

98. **Homburger F.** Unfälle in elektrischen Stark — Stromanlagen in Scheizen, 1959—1960 // Bull. SEV. 1962. № 2. 1966. № 3. 1967. № 2. 1973. № 3.

99. **Köppen S., Eichler R., Osypka P.** Der elektrische Unfall — Anatomische, physiologische, klinische neurologische, psychologische Untersuchungen und technische Analysen nach Wechsel- und Gleichspannungsunfällen // Elektromedizin. 1961. S. 215—251. 1962. S. 35—59, 90—106.

100. **Köppen S., Osypka P.** Die Beurteilung von Herz- und Nervenkrankungen und Schädigungen der inneren Organe nach elektrischen Unfällen // Berufsgenossenschaft. Berlin. 1962. № 3. S. 106—109. № 4. S. 141—145.

101. **Kouwenhoven W. B., Milnor M. D.** Field treatment of electric shock cases // Trans. Paber. 1973. P. 1—85.

102. **Kramer H., Kupfer J.** Veränderungen des arterien Blutdrucks bei Ratten Kaninchen die herznaher elektrischer Reizung mit sinusförmigen Wechselstrom // Biomedizinische Technik. Berlin. 1972. Bd. 17. № 1. S. 21—24.

103. **Kupfer J.** Verlauf der Schwelle für die Auslösung von Herzkammerflimmern durch 50-Hz-Wechselströme // Elektrisch. Berlin. 1979. Bd. 33. № 11. S. 608—609.

104. **Kupfer J.** Erkenntnisse über zulässige Körperströme beim Menschen // Berlin: Fernmeldetechnik. 1980. Bd. 20.

№ 5. S. 195—197.

105. **Lafitte V.** Le «facteur humain» dans les accidents du travail // Rev. de la nouvelle médecine. Janvier 1956. № 6. P. 21.

106. **Manoilow E., Manollow B.** Exper. Einwirkung den elektrischen Starkstroms // Wien klin. Wochenschr. 1935. № 1. S. 13—15.

107. **Mattuews B.** The nervous system as on electrical instrument // Journ. of IEE. 1948. Vol. 95. P. 98—100.

108. **Müller R.** Schutzmassnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung in Niederspannungsanlagen // VEM-Handbuch. 7 Auflage. Berlin: Technik. 1981.

109. **Ocyпка P.** Messtechnische Untersuchungen für Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechsellstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen // Elektromed., med. Elektronik. Berlin. 1963. Bd. 8. S. 153—173. 193—214.

110. **Schäfer H.** New problem of the electrical accidents // Bull. Int. Sek. IVSS. 1972. № 5. P. 151—154.

111. **Schwan H. W., Piersol G. M.** The absorption of electromagnetic energy in body tissues. Pt. 1 // Am. Journ. of Physiol. Med. 1957. Vol. 33. № 6. P. 371—374.

112. **Simon C.** Unfälle durch Elektrizität in der Bundesrepublik und in anderen europäischen Ländern // Elektrizitätswirtschaft. 1978. № 10. S. 230—235.

113. **Singer F.** Electric shock and man // Ind. and East. Eng. 1982. № 3.

114. **Wolkowinski K.** Uziemienia urzadzzen elektroenergetycznych. Warszawa: 1967.

115. **Young B. K.** Accidents — are they really necessary? // Journ. Roy. Inst. Publ. Health and Hyg. 1955. № 18. P. 372.

116. **Zental.** Statistik elektrische Unfällen // Elektrotechnik und Maschinenbau. 1980. № 9. S. 402—408.

- Абрамян В. К. 190
 Аврущенко М. А. 48, 49
 Ажибаев К. А. 139, 142, 170, 174, 176, 177, 178, 180, 258, 261, 262, 265, 267
 Александров Э. И. 201
 Альвенслебен К. 198
 Альверес В. 266
 Антомонов Ю. Г. 256
 Антони В. 330
 Архангельский К. С. 26
 Асеев Г. П. 274

 Бараш М. И. 201
 Барбашова З. И. 265
 Бацеливич И. Э. 218
 Беккер Н. С. 443
 Белицкий Г. Ю. 141, 195
 Белянинов Н. Н. 26
 Берг Х. 266
 Березин В. Б. 276
 Бернал Дж. 17
 Бигельмейер Дж. 254
 Бирюков Д. А. 265
 Болл Г. 201, 356
 Брогхаммер Г. 258
 Брухнер Б. 229
 Булатов А. К. 265
 Бурак И. Н. 200
 Бургсдорф В. В. 362, 370
 Бурденко Н. Н. 19
 Бурнет Дж. 330
 Буртон Х. 201, 255
 Бурцева Г. Е. 297

 Вагнер В. 202
 Вайнштейн Л. И. 96, 429
 Введенский Н. Е. 246
 Вебер В. 230
 Ведентьева Р. А. 141
 Вигдорчик Н. А. 48, 162, 179, 198, 201, 202, 247
 Вильгейм Р. 313
 Вильке 258
 Винер А. 199
 Вихриев Б. С. 382
 Власов С. П. 151, 236, 249
 Вогралик В. Г. 155
 Войнаровский П. Д. 24, 25
 Волковинский К. 330, 369
 Вольта А. 23, 251
 Вольтер Л. 179, 260

 Вольховер С. Т. 266
 Ворошилов Б. М. 154, 215

 Гальвани Л. 23, 136
 Геберт Т. 38
 Гибберт Т. 64
 Гильберт У. 136
 Гильдемейстер М. 195, 197, 201
 Гогодзе Т. В. 397
 Гордон Г. Ю. 50
 Гориневская В. В. 8
 Гориневский В. В. 8, 20
 Готман П. Е. 276
 Граве В. И. 4
 Григорьев М. Г. 398
 Гринберг А. В. 171
 Гудэрски 72, 254, 258, 259
 Гулен Ф. 16
 Гурвич Н. Л. 170, 172, 236

 Давидов А. А. 440
 Дальзиель Ц. 141, 151, 162, 168, 232, 244, 247, 251, 252, 253, 254, 260, 355, 356
 Дарсонваль Г. 167
 Дерягин Б. В. 183
 Долин П. А. 12, 151, 411, 438, 439
 Домбровский 330
 Дул 266
 Дюбуа-Реймон 246, 251

 Евтушенко Г. И. 267
 Егизарян Э. С. 41
 Еллинек С. 37, 38, 44, 45, 72, 138, 139, 140, 167, 176, 179, 197, 201, 236, 248, 260, 297

 Желиховский Х. М. 294
 Жидков В. О. 314
 Жиленков И. В. 200

 Илипаев И. И. 267
 Ильин Ю. Н. 314

 Кадыков Б. И. 260
 Каканович А. Н. 201
 Капустин А. А. 349
 Картушенко А. Г. 265, 266
 Карякин Р. Н. 151, 236, 249
 Кервран В. 158, 194
 Кертис Г. 158, 194, 211
 Кёппен С. 139, 141, 145, 162, 169, 180, 235, 236, 238—242, 247, 253

Киллингер Л. 224
 Кирдо Л. 229
 Киселев А. П. 201, 236, 254, 261
 Клышко 38
 Князевский Б. А. 12, 28
 Ковенховен В. 209, 247, 411, 412, 413, 415
 Козлов В. И. 322, 323, 439
 Колобуд Ф. А. 267
 Коль С. 158, 211
 Копытов Ю. В. 429
 Корж Н. А. 325, 330
 Королькова В. И. 28, 48, 209
 Костенко М. В. 413
 Кох В. 362, 365, 367
 Крамер Х. 141
 Кранская О. М. 145
 Крикунов М. Ф. 62, 64
 Кротков И. Н. 215
 Купфер Дж. 139, 141, 151, 154, 156, 160, 162, 176, 209, 236

Ланг 236
 Лафит В. 16
 Лебедев С. А. 417
 Лёбль О. 297, 350
 Лее 173
 Лейбов Р. М. 294, 350
 Леруа де Меркюр 137
 Ливенцев Н. М. 207
 Лисица Ф. М. 158
 Логинова Е. А. 20
 Ложье А. 229
 Лоран П. 201, 362, 364, 365, 366, 369
 Любан Г. Л. 170

Маклахнен О. 247
 Малов Н. Н. 27, 199
 Манойлов Е. О. 36
 Марат Ж. 23, 136
 Маркевич Г. 330
 Матюшин М. В. 80
 Метцигер В. 291
 Метьюс Б. 206, 207
 Миндели Г. Ф. 350
 Минор Л. Б. 158
 Михальцев И. Е. 269, 270, 416
 Мищенко И. К. 169, 253, 261, 263
 Монсоре Г. 136
 Морозов Ю. А. 12, 413, 415, 417, 421
 Мосс В. 265
 Мурзанов Ю. М. 294
 Мусахин Л. С. 145

Мухин Е. О. 17, 19
 Мюллер Р. 330
 Найфельд М. Р. 330
 Насонов Д. Н. 229, 256
 Наумовский Л. Д. 30, 79, 80, 81
 Неговский В. А. 168
 Нетушил А. В. 226
 Никифоровский Н. Н. 318
 Никольский Д. П. 20

Обросов А. Н. 265
 Олехнович Н. В. 294
 Оллендорф Ф. 362, 367
 Орбели Л. А. 240
 Орлов А. Н. 104, 110, 146, 150
 Орлов Б. В. 260
 Орлов Н. И. 350
 Осадчий П. С. 25
 Осипка П. 35, 139, 141, 151, 176, 180, 199, 208, 210, 222, 224, 236, 239, 241, 242, 244, 245, 246, 253, 254
 Ослон Л. Б. 330, 354, 355, 356, 362, 367

Павлов И. П. 19, 268
 Петри Л. О. 443
 Петров В. В. 19, 23, 137
 Петров И. Р. 168, 260, 263
 Пиасек 369
 Пирогов Н. И. 19
 Пирсоль Г. 215, 216
 Погожев А. В. 20
 Подольский Л. П. 197, 209
 Подшебякин А. К. 266
 Познанская Н. Б. 153, 154, 155, 198
 Портнов Ф. Г. 156, 265
 Пресман А. С. 266
 Пресс С. А. 72

Регентов С. А. 150
 Решодько Л. В. 256
 Ржевкин С. Н. 27, 199
 Ривлина Х. С. 158
 Роднянский Л. Л. 9
 Розенталь Д. Л. 229
 Рубинштейн Д. Л. 211, 212
 Рудовский В. 387
 Руфанов И. Г. 8
 Рюденберг П. 362
 Рябова Т. Я. 157

Саалиев Э. С. 178
 Сазонова Т. Е. 414, 415

Сант-Дьёрдьи А. 139
Саркисов М. А. 150
Сейма Н. П. 322
Семенов А. П. 12
Сеневский А. Н. 274
Сергеева Ю. С. 158
Серов Л. В. 265
Сеченов И. М. 153
Сидоров А. Г. 261
Сидоров И. Ф. 218
Симон Ц. 47
Сирота И. М. 350
Сканави Г. И. 200
Скворцов Ф. Ф. 62, 64
Скоробогатова А. М. 265
Смуrow А. А. 26, 27, 79
Снеточкин Ю. В. 261
Солодовников Г. С. 28, 260, 261
Стассен М. 168, 237
Стороженко С. Н. 9
Султаналиев А. С. 262
Сыромятникова И. Н. 158
Сысоев Ф. Ф. 41

Табанос К. К. 226
Тарнопольский Я. И. 7
Тарусов Б. Н. 209
Тарханов И. Р. 153, 258
Терсяк 72, 254, 258, 259
Тишков А. Р. 193
Тишков И. П. 201
Токата 266
Троицкая А. Д. 204, 205, 206
Туркменов М. Т. 142, 170, 171, 261

Уориш А. 23
Уотерс М. 313
Ухтомский А. А. 246
Ушинская О. Ф. 260, 261

Феррис Л. 138, 139, 168, 173, 220
Филиппов В. И. 50
Фогельсон Л. И. 168, 170, 172
Фрайберггер Х. 27, 151, 193, 197,
199, 201, 209
Фрейман И. Г. 26, 27
Фрейт 331
Френкель Г. Л. 31, 139, 141, 142,
177, 209, 237, 247, 257, 258, 261,
267

Френкель Е. В. 116, 209
Фрике Дж. 211

Хавин Н. З. 48, 49
Хаецкий С. А. 26
Хайкин А. М. 276
Хитцинг А. 201
Хлопин Г. В. 20
Холштейн Дж. 167
Хурвег Ф. 251

Цапенко Е. Ф. 294, 295, 296
Ципп А. 440

Чаговец В. Ю. 258
Чернышев Н. Л. 266
Чижевский А. Л. 266
Чиколев В. Н. 23, 24
Чистякова Е. Н. 200

Шалыт Г. М. 283
Шван Х. 139, 199, 215, 216, 265,
356
Шварц 236
Шедриков В. А. 206
Шефер Д. 236
Ширяева П. П. 284
Шишкин Н. Ф. 350
Школдин Ф. Л. 72
Шнейдер 236
Шпор П. Е. 375
Шривер Х. 229
Штромберг Г. Д. 440
Шуцкий В. И. 201, 261, 314, 316

Щеглов А. П. 282

Эйди В. 269
Эйхлер Р. 238
Эпштейн Г. Я. 8
Эрисман Ф. Ф. 20
Эскин В. Я. 170, 261

Языков К. М. 20
Яковлева М. И. 411
Якобс А. И. 53, 330, 362, 373
Янг Б. 16
Яновский 369
Ясный В. К. 294
Яшина Л. Н. 267

Предисловие	3
Глава первая. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ БОРЬБЫ С ТРАВМАТИЗ- МОМ	5
1.1. Определения	—
Значение терминологической ясности (5). Основные термины (7). О содержании, вкладываемом в понятие «основы электробезопас- ности» (14)	
1.2. Травтовка промышленного травматизма в капиталисти- ческих странах	14
Подход к охране труда (15). Инженерная психология о причинах травматизма (15)	
1.3. Борьба с промышленным травматизмом в нашей стране	17
Становление отечественной травматологии (17). Метод травма- тологии в СССР — профилактика (20)	
Глава вторая. ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ, ЕГО УЧЕТ И ХАРАК- ТЕРИСТИКА	23
2.1. Из истории электробезопасности	—
Первые представления об опасности электрического тока (23). Первые правила электробезопасности (24). Вклад отечественных ученых в разработку проблем электробезопасности (26)	
2.2. Показатели электротравматизма и классификация электро- травм	29
Коэффициенты, характеризующие травматизм (29). Класси- фикация электротравм (30)	
2.3. Данные учета и их использование	31
Значение научно обоснованной методики расследования электро- травм (31). Первичная документация (32). Неполнота данных, собираемых при расследовании электротравм (34). Материалы, которыми располагал автор (36)	
2.4. Судебно-медицинская экспертиза	37
Важность комплексных расследований (37). Обязательность вскрытия погибших (37). Диагностическое значение электроме- ток (40). Изменения в селезенке (41). Усовершенствование систе- мы расследования смертей от электричества (42)	
2.5. Характеристика электротравматизма в капиталистических странах	43
2.6. Характеристика электротравматизма в СССР	48
Действенные средства борьбы с травматизмом (48). Публичное обсуждение проблемы (48). Обобщение и анализ материалов по электротравматизму (49). Электротравматизм в отдельных от- раслях народного хозяйства (50)	
2.7. Электротравматизм в социалистических странах	55
Глава третья. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ	58
3.1. Распределение электротравм по напряжениям установок	—
Поражения на установках напряжением выше и ниже 1000 В (58). Поражения малым напряжением (59)	
3.2. Распределение электротравм по профессиональной при- надлежности пострадавших	65

3.3. Распределение электротравм по роду тока	70
3.4. Распределение электротравм по условиям возникновения электрической цепи через тело человека	74
3.5. Распределение электротравм по видам оборудования	75
Воздушные линии электропередачи (79). Внутренние сети (83). Трансформаторы и распределительные устройства (85). Электропривод (86). Электросварочные агрегаты (87). Высокочастотные установки (88). Подъемно-транспортные устройства (89). Переносные электроприемники (89). Электроосветительные установки (90)	
3.6. Распределение электротравм по времени суток и месяцам года	91
Глава четвертая. ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ В КВАРТИРАХ, ДОМАХ И КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ	
4.1. Электротравматизм в квартирных электросетях	95
4.2. Домовые электросети	98
4.3. Коммунально-бытовые сети	100
4.4. Электротравматизм в сетях наружного расположения	—
4.5. Поражения электрическим током в быту	102
Глава пятая. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТРАВМ	
5.1. Методика	—
5.2. Поражения при напряжении сети 12—36 В	113
5.3. Поражения постоянным током	119
5.4. Поражения при напряжении сети 220 В	123
5.5. Приложение аналитического метода к инструментальному расследованию электротравм	128
Наведенное напряжение (128). Электрические удары (132). Выводы из инструментального расследования электротравм (134)	
Глава шестая. МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЧЕЛОВЕКА	
6.1. Первые исследования	—
6.2. Опыты на животных и допустимость распространения полученных данных на человека	138
Фиксация тела (139). Фактор внимания (140). Окружающая среда (141)	
6.3. Лечение людей, перенесших электротравму, — источник познания механизма действия электрического тока	143
6.4. Особенности механизма поражения человека электрическим током	151
Электрическое сопротивление биообъекта (151). Электроожоги (152). Акупунктурные зоны (153). Роль различных раздражителей (158). Итоговая формулировка (159)	
6.5. Тепловое и электрохимическое действие электрического тока	159
6.6. Первично поражаемая система — кровообращение или дыхание?	167
К истории вопроса (167). Ограниченная ценность результатов при экспериментальных электротравмах (169). Кардиоцикл и момент включения электрической цепи (171). Современное состояние	

- вопроса — спор не решен (172). Человек — саморегулирующаяся система (173). Выводы (176)
- 6.7. Состояние пораженного организма 178
- Болезни человека, утяжеляющие исходы электротравм (178).
Сила и слабость электротерапевтических методов (180)

Глава седьмая. СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЗАЩИТА ОТ НЕГО

- 7.1. Основные представления об электризации —
- 7.2. Источники статического электричества 184
- 7.3. Опасность статического электричества 186
- 7.4. Защита технологического оборудования от опасных проявлений статического электричества 187
- 7.5. Контроль параметров статического электричества 189

Глава восьмая. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ЧЕРЕЗ ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА

- 8.1. Основные особенности —
- 8.2. Электропроводность живой ткани 194
Природа электропроводности и ее виды (194). Специфика электропроводности биологических объектов (194). Комплекс факторов, определяющих электропроводность тела человека (197)
- 8.3. Нелинейность электрического сопротивления живой ткани 198
- 8.4. Численные оценки электрического сопротивления тела человека 201
Условность общих оценок (201). Кожа (202). Нервы (204). Конкретизация оценок (208). Электрическая прочность тканей тела (209)
- 8.5. Полное электрическое сопротивление тканей тела 211
Эквивалентные схемы (211). Переходный процесс (213)

Глава девятая. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ТЯЖЕСТЬ ИСХОДА ЭЛЕКТРОТРАВМЫ

- 9.1. Предыстория нормирования безопасных значений напряжения и тока —
- 9.2. Напряжение 221
Исходные позиции (221). Поражающее напряжение (221). Напряженность поля (224). Форма электродов и их расположение на теле (228). Состояние кожи (229). Форма кривой (231). Постоянное и переменное напряжение (232). Нормирование поражающих напряжений (233)
- 9.3. Электрический ток 235
Численные значения тока (235). Деление пораженных на «синих» и «красных» (237). Экспериментальное определение ощутимых токов (242). Неотпускающий ток (245). Переходный режим (246). Путь тока (247). Чувствительные к току (уязвимые) места на теле человека (249). Нормирование поражающих токов (249)
- 9.4. Продолжительность существования электрической цепи 250
Зависимость исхода поражения от фактора времени (250). Определение численных значений безопасного времени (251). Нелинейный характер зависимости (253)
- 9.5. Что опаснее — переменный или постоянный ток? 257
- 9.6. Влияние частоты 260
- 9.7. Воздействие окружающей среды 262
Атмосферные условия (262). Электрическое поле (265). Магнитное поле (266)

9.8. На пути к новому пониманию механизма электротравмы	268
9.9. Расчетные рекомендации	271

Глава десятая. ИЗОЛЯЦИЯ — ГЛАВНЕЙШЕЕ СРЕДСТВО ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ 275

10.1. Свойства изоляции, используемой в качестве защитного средства	—
10.2. Качество изоляции и методы профилактических испытаний ее	278
Требования к изоляции (278). Профилактика неисправностей электрооборудования (280). Профилактические испытания (281)	
10.3. Измерение сопротивления изоляции в сети напряжением ниже 1000 В	286
Данные по промышленности в целом (286). Изоляция в особо сырых помещениях (287). Эффективность профилактических испытаний (287)	
10.4. Места пониженного сопротивления изоляции в сети напряжением ниже 1000 В	290
Подключающие устройства (290). Электрооборудование специального исполнения (291). Замена металлических частей изоляционными (291)	
10.5. Непрерывный контроль за состоянием изоляции	292
10.6. Изолирующие полы — надежное средство электробезопасности	296
Опасность токопроводящих полов (296). Требования к полам (298). Характеристика полов (300). Критерии безопасности (301)	
10.7. Режим нейтрали и его значение в решении проблемы электробезопасности	302
Режим с эффективно заземленной нейтралью (305). Режим с глухозаземленной нейтралью (306). Режим с изолированной нейтралью (307). Режим с компенсированной нейтралью (308). Режим с резистированной нейтралью (310)	
10.8. Контроль изоляции и защита электросетей	312
10.9. Электробезопасность на судах	317

Глава одиннадцатая. ЗАЩИТА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО НА КОРПУСАХ ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1000 В 321

11.1. Особенности повреждений в установках напряжением ниже 1000 В	—
11.2. Защитное заземление	324
Физическая сущность заземления как средства защиты (324). Нормирование сопротивления заземления (329). Исследования и инженерные решения (330)	
11.3. Зануление	331
Физическая сущность зануления как средства защиты (331). Требования, предъявляемые к системам зануления (333)	
11.4. Об эффективности систем заземления и зануления	336
11.5. Распределение напряжения, возникающего на заземленном или зануленном оборудовании напряжением ниже 1000 В	338
Напряжение прикосновения в системе с сосредоточенным повторным заземлителем (339). Напряжение прикосновения в зануляющей системе (342). Напряжение прикосновения в четырехпроводной сети (345)	

11.6. Факторы, влияющие на надежность заземления и зануления	347
11.7. Защитное отключение	349
Определение (349). Физическая сущность отключения как средства защиты (350)	
Глава двенадцатая. УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА ПОДСТАНЦИЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В.	353
12.1. Два подхода к проблеме	—
12.2. Комплекс работ при сооружении заземляющего устройства подстанции	357
12.3. Исходные данные для проектирования заземляющих устройств	358
Исследование грунта (358). Рекомендации относительно расчетного тока (359). Особенности заземления подстанций, работающих в сетях с изолированной нейтралью (361)	
12.4. Основы проектирования заземляющих устройств подстанций	362
Выравнивающие сетки (362). Расчет напряжения шага (368). Уменьшение напряжения шага вне контура (369). Вынос потенциала (370)	
12.5. Учет неоднородности грунта при расчетах простых и сложных заземлителей	370
12.6. Особенности проектирования заземлений закрытых распределительных устройств	374
12.7. Определение проводимости естественных заземлителей Кабели (375). Система «трос — опора» (376). Железобетонные фундаменты (376)	375
Глава тринадцатая. ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРООЖОГОВ	377
13.1. Почему это важно	—
13.2. Классификация ожогов	383
Что мы относим к электроожогам (383). Механизмы поражения биотканей при электротравмах (385). Классификация ожогов (387)	
13.3. Проблемы лечения ожогов	391
13.4. Проблемы диагностики ожогов	394
Традиционные методы (394). Нетрадиционные методы (396). Перспективы (398)	
13.5. Метод инфракрасного зондирования в диагностике ожогов	399
Сущность метода (399). Датчики (400). Базовая схема (400). Приборы ИСТОК (402). Метрология (405). Диагностические критерии и оценка достоверности метода (405). Выводы (409)	
Глава четырнадцатая. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	410
14.1. Опасность электрических и электромагнитных полей для человека	—
14.2. Нормирование безопасных значений напряженности поля	411
14.3. Защита персонала от воздействия электрических и электро-	

магнитных полей	416
Конструктивные меры (416). Устройство временных экраниру- ющих приспособлений (417). Экранирующая одежда (419). Конт- роль электрических и электромагнитных полей (421)	
14.4. Защита людей от наведенных напряжений	422
Меры на линиях связи (422). Меры на автомобильных доро- гах и строительных площадках (424)	

Глава пятнадцатая. ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА И ЭЛЕКТРОБЕЗО- ПАСНОСТЬ

15.1. Научная организация труда в электроэнергетике	426
15.2. Порядок производства работ на электроустановках	427
15.3. Электротехнические правила	428
15.4. Средства личной защиты	432
Определения (432). Классификация (434). Требования, предъ- являемые к средствам личной защиты (434). Комплектация и испытания (437)	
15.5. Сигнализация наличия напряжения	439
Указатели напряжения выше 1000 В (439). Указатели напряжения ниже 1000 В (443)	

Глава шестнадцатая. БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА ОХРАНЯЕТСЯ ЗАКОНОМ

16.1. Основы законодательства по охране труда и технике безопасности	445
Законодательное обеспечение безопасности труда (445). Система мер по охране труда (447)	
16.2. Ответственность и виновность	447
Трудности, возникающие при экспертизе (448). Опирайтесь на законодательство! (449). Круг должностных лиц (449). Ответ- ственность рядовых исполнителей (451). Правовые обязанности преподавателей технических учебных заведений (451). Квалифи- кация преступления (451). Установление причинной связи (452)	
16.3. Контроль и надзор за выполнением правил техники безопасности и санитарно-гигиенических норм	454
16.4. Роль технической экспертизы при расследовании сложных электротравм	456
16.5. Достоверность ответственности	463
Список литературы	466
Именной указатель	472