

С.Г.Бабаев, И.А.Габибов, Р.Х.Меликов

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Министерство Образования Азербайджанской Республики
Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия

Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования

Под общей редакцией д-ра техн. наук,
проф. С.Г. Бабаева

Допущено Министерством Образования Азербайджанской Республики в качестве учебника для студентов и магистрантов вузов, обучающихся по специальности «Инженерные технологии повторной обработки и восстановления»

(Приказ № 330. от 01.04.2015)

Баку – 2015

Бабаев С.Г., Габитов И.А., Меликов Р.Х. Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования. Учебник. Под общей ред. С.Г.Бабаева. Баку, изд. АГНА, 2015. - 400 с.

Рецензенты: д.т.н., профессор Намазов С.Н.
д.т.н., профессор Мамедов В.Т.

Учебник содержит теоретические и практические вопросы надежности и технологичности сложных систем машиностроения. Приведены методы обеспечения и нормирования надежности, а также основы рациональной организации системы и стратегий технического обслуживания с учетом периодического повторного монтажа-демонтажа оборудования.

Разработаны математические модели функционирования оборудования, определения рациональной периодичности контрольных технических осмотров, оценки остаточного межремонтного ресурса машин и агрегатов после очередного демонтажа.

Приведены методы повышения безотказности и ремонтно-пригодности сборочных единиц и агрегатов на основе формирования условных подсистем. Изложены результаты определения структуры ремонтной, эксплуатационной и монтажной технологичности оборудования. Приведены типовые примеры и их решения.

Учебник предназначен для студентов и магистрантов механических специальностей вузов, а также может быть использован инженерами и научными сотрудниками, работающими в области исследования, проектирования, производства и технической эксплуатации изделий машиностроения, а также преподавателями высших технических учебных заведений.

Введение

Современная техника, применяемая для бурения и эксплуатации нефтяных и газовых скважин, характеризуется значительным многообразием конструкций машин и агрегатов, обусловленным чрезвычайно широким диапазоном технологических функций, сочетающихся к тому же разнообразием типоразмеров и модификаций. Кроме того, значительные отличия имеют условия эксплуатации: производственно-технологические особенности, воздействие факторов неблагоприятных условий внешней среды, высокий уровень и нестационарность действующих нагрузок и скоростей, и как следствие, зачастую недостаточный уровень функциональной надежности.

Последнее связано с значительным объемом ремонтно-восстановительных работ, с частой заменой отработавших свой ресурс узлов и агрегатов. А это требует в свою очередь повышения технического уровня и надежности применяемого нефтепромыслового оборудования, улучшения его технико-экономических и эксплуатационных показателей.

Поэтому одним из важных направлений в проблеме управления надежностью нефтепромыслового оборудования является совершенствование методов обоснования и расчетов нормированного его уровня.

Обеспечение требуемой надежности объекта зависит не только от уровня конструкторской разработки, но и от принятой технологии производства, качества материалов, культуры и организации технического обслуживания и ремонта. В свою очередь эксплуатационные свойства оборудования в значительной мере зависят от обеспечения обоснованной точности размеров, формы обработанных поверхностей, их взаимного расположения; от определения рациональных методов достижения точности сборки.

Одним из основных направлений при этом является повышение надежности при поэтапном совершенствовании конструкций путем устранения основных их недостатков, приводящих к преждевременным отказам и значительным затратам времени на восстановление.

Важным является также изыскание путей повышения ресурса быстроизнашивающихся деталей, так как частые отказы в эксплуатации требуют проведения большого объема неплановых ремонтов, а следовательно, разборочно-сборочных и демонтажно-монтажных работ. Установление причин подобных отказов, конструктивно-

технологические решения по их устранению и снижение затрат на выполнение ремонтных работ являются особенно важными на стадии модернизации и проектирования нового оборудования.

Перечисленные задачи должны решаться исходя из современных положений теории надежности машин, в увязке с развитием технологии их производства и конкретными условиями эксплуатации.

В связи с отмеченным необходимым является проведение анализа причин отказов нефтепромыслового оборудования, установление требований, которые должны быть соблюдены при проектировании, изготовлении и эксплуатации машин и агрегатов с учетом их безотказности, долговечности, ремонтпригодности, монтажепригодности и сохраняемости.

В целом возникает необходимость системного подхода к решению отдельных задач и проблемы повышения надежности в целом, возрастает значение исследования причин отказов различных видов оборудования, исследований в области обеспечения надежности и высокого уровня эксплуатационной готовности на основе повышения ресурса и обеспечения ремонтной технологичности нефтепромысловой техники.

Отмеченный круг вопросов и составляет основное содержание настоящего учебника.

Учебник снабжен большим числом примеров, основанных на конкретном практическом материале, выполненном в проблемной лаборатории надежности НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия», а также отдельными аспирантами и докторантами Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии.

Создание настоящего учебника вызвано необходимостью оказания помощи студентам и магистрантам высших технических учебных заведений, и в первую очередь при изучении теоретических основ дисциплины «Надежность нефтепромыслового оборудования» по специальности 050646 – «Инженерные технологии повторной обработки и восстановления».

1. Конструктивные особенности нефтепромыслового оборудования и требования к его надежности

1.1. Краткая характеристика применяемого оборудования

Специфика конструкций применяемого нефтепромыслового оборудования связана, прежде всего с условиями монтажа, эксплуатации и ремонта, особенностями и разнообразной номенклатурой сложных установок, наземного и подземного оборудования, обеспечивающих выполнение самых различных технологических функций при сложных условиях бурения, добычи, исследования и ремонта скважин.

Так, наряду с стационарной установкой машин и агрегатов в проектное положение, характерным для отдельных видов оборудования (буровые и нефтепромысловые установки и др.) является периодическое пребывание его в монтаже, работе, демонтаже и транспортировании с точки на точку. Актуальными и в то же время недостаточно изученными являются также вопросы, связанные с обеспечением нетрадиционных требований к ремонтной, монтажной и эксплуатационной технологичности оборудования.

А так как наряду с геологической структурой и глубиной залегания продуктивных пластов, каждое месторождение отличается расположением относительно баз снабжения и ремонтных предприятий, спецификой рельефа, климата и многими другими особенностями, то обеспечение необходимого уровня надежности нефтепромыслового оборудования представляет собой одну из сложных и малоизученных проблем общей теории надежности.

Состав и конструкции нефтепромысловых машин и оборудования обусловлены характером промысловых функций и конкретным назначением. К основным видам выполняемых функций, связанных с промышленным освоением продуктивных месторождений, относятся:

- бурение скважин на нефть и газ;
- исследование (испытание) пробуренных скважин на продуктивность;
- эксплуатация скважин, производящаяся в зависимости от пластового давления различными способами - фонтанным, газлифтным, механизированным;
- текущий и капитальный ремонты скважин, при которых производится смена скважинного оборудования, промывка и обра-

ботка скважин, закачка растворов в пласт для повышения его отдачи, проведение ловильных и других работ.

В решении проблемы повышения эффективности бурения скважин, важную роль играют условия эксплуатации оборудования. В силу повышенной капиталоемкости глубоких скважин наиболее ответственным, с точки зрения необходимости обеспечения высокой надежности, является оборудование для бурения глубоких разведочных и эксплуатационных скважин.

Современная установка для бурения глубоких скважин на нефть и газ включает комплекс функционально связанных и взаимодействующих между собой основных и вспомогательных агрегатов и механизмов.

В соответствии с технологическим процессом проводки скважин буровые установки состоят из следующих основных групп оборудования:

1. Комплекс оборудования для спуско-подъемных операций, состоящий из узлов и механизмов главного подъема, обеспечивающих все операции, связанные с подъемом и спуском (подачей в процессе бурения) колонны бурильных труб, а также обсадной колонны. В состав этого комплекса входят - силовой привод главного подъема, трансмиссии, буровая лебедка, вышка, узлы талевого системы, гидродинамический тормоз, механизм (автомат) подачи долота, устройства для механизации спуско-подъемных операций.

2. Комплекс механизмов гидравлической системы, предназначенных для нагнетания под высоким давлением промывочной жидкости в зону работы долота с целью очистки забоя скважины от выбуренной породы, а также для приведения во вращение забойного двигателя при турбинном способе бурения. В этот комплекс входят: поршневые буровые насосы высокого давления, манифольды нагнетательной и всасывающей линий, вертлюг, оборудование для приготовления, приемки и очистки (регенерации) промывочной жидкости.

3. Комплекс механизмов, обеспечивающих вращение долота, включающий ротор с приводом индивидуальным или от общего энергоблока и трансмиссии.

4. Оборудование и механизмы, предназначенные для выполнения дополнительных функций, не связанных непосредственно с технологическим процессом бурения, монтажно-транспортная база или сборно-разборные основания, грузоподъемные средства для механизации вспомогательных и ремонтных работ и т.д.

Кроме того, буровая установка, как правило, включает проти-

вовыбросовое оборудование, обеспечивающее герметизацию устья скважин с целью исключения возможного выброса и предупреждения связанных с ним осложнений и аварий в процессе бурения.

Одной из главных отличительных особенностей глубокого бурения скважин на нефть и газ является необходимость периодического демонтажа транспортирования и последующего монтажа сооружений и агрегатов на различных точках бурения. Учитывая, что масса отдельных блоков и агрегатов буровых установок составляет до нескольких десятков тонн, а габариты измеряются десятками метров, монтажно-демонтажные работы являются наиболее сложными в организации и трудоемкими в исполнении.

При эксплуатации нефтяных и газовых скважин, с целью устранения различных нарушений в режиме их эксплуатации и отказов подземного оборудования, выполняется текущий ремонт скважин. А при необходимости устранения различных аварий и возникших дефектов эксплуатационной колонны производится капитальный ремонт скважин.

На рис.1.1 приведен, в виде примера, состав оборудования для подземного ремонта скважин, а на рис.1.2 приведена классификация основных видов восстановительных работ и геолого-технических мероприятий, характерных для текущего и капитального ремонтов скважин.

Осуществление большинства из перечисленных видов подземного ремонта требует проведения определенных демонтажно-монтажных работ, основу которых составляют спуско-подъемные работы. Из-за технологических особенностей выполнения этих видов работ применяется обширная номенклатура машин и механизмов (см.рис.1.1), отличающихся спецификой и большим разнообразием. К ним относятся установки на транспортной базе, средства механизации, инструмент для выполнения необходимых операций и скважинных работ.

Отдельные скважины оборудуются стационарными вышками или мачтами, предназначенными для спуска и подъема колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) или штанг при ремонтных работах, проводимых на скважине. Как правило, на этих скважинах для спуско-подъемных работ применяются тракторы-подъемники с лебедкой. В случае отсутствия стационарных вышек и мачт широко применяются различные самоходные подъемные установки на автомобильной или тракторной базе. Выбор установки, комплекса оборудования и инструмента зависит от глубины ремонтируемой скважины, характера и степени сложности производимых работ.

Состав оборудования для подземного ремонта скважин



Рис.1.1.

Основные виды восстановительных и геолого-технических мероприятий

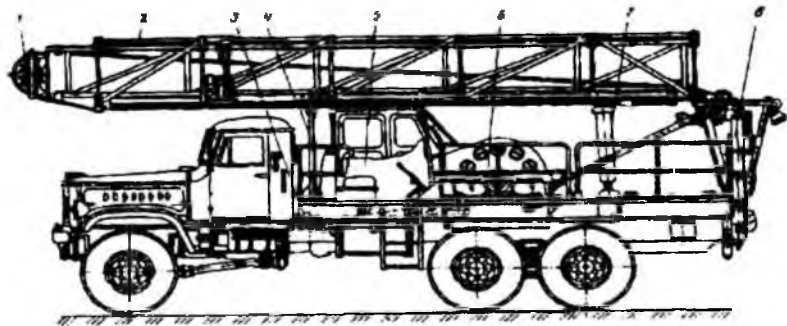


Рис.1.2.

Отечественное нефтяное машиностроение накопило значительный опыт проектирования и изготовления нефтепромыслового оборудования. Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения (АзИНМАШ) имеет многолетний опыт проведения исследований и разработок конструкций различного оборудования, в том числе: для ремонта и цементирования скважин; интенсификации добычи, связанной с закачкой жидких сред при гидравлическом разрыве пластов и гидропескоструйной перфорации; кислотной обработки призабойной зоны скважины; промывки песчаных пробок и других промывочно-продавочных работ в нефтяных и газовых скважинах. Основу комплексов такого оборудования составляют передвижные насосные установки (также смесительное и устьевое оборудование), передвижные манифольды, автоцистерны и др. Это оборудование отличается мобильностью, разнообразием типов и параметров. Широко применяются подъемные установки, оснащенные механическими, гидравлическими, пневматическими, электрическими системами и предназначенные для спуска и подъема насосно-компрессорных труб (НКТ) и штанг, а также их свинчивания и развинчивания [41].

Подъемная установка АзИНМАШ-37А предназначена для спуско-подъемных операций с укладкой труб и штанг на мостки при текущем и капитальном ремонте нефтяных и газовых скважин (рис.1.3). Установка самоходная, смонтирована на шасси автомобиля для высокой проходимости. Номинальная грузоподъемность - 320кН.

Передвижная подъемная установка АзИНМАШ-37А



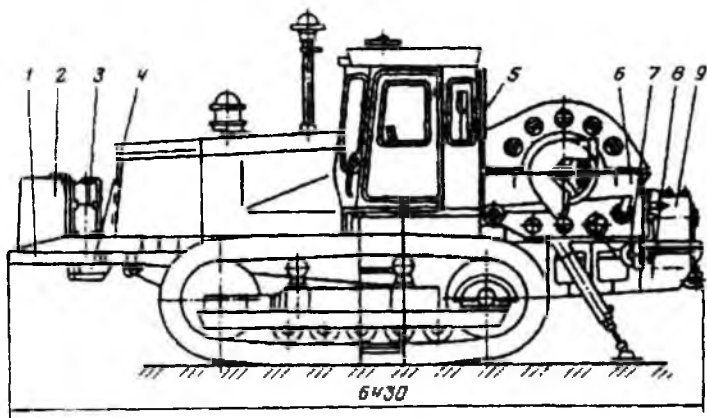
- 1 - талевая система; 2 - телескопическая вышка; 3 - силовая передача; 4 - передняя опора; 5 - кабина оператора; 6 - лебедка; 7 - гидроцилиндр подъема вышки; 8 - задняя опора.

Рис.1.3.

Подъемная установка УПТ-32 предназначена для производства спуско-подъемных операций в процессе текущего и капитального ремонта нефтяных и газовых скважин глубиной до 2400 м. Ее отличительной особенностью является система вертикальной установки труб и подвески штанг, высокая производительность за счет совмещения операций в процессе спуско-подъема труб. Установка самоходная, смонтирована на гусеничном тракторе. Номинальная грузоподъемность - 320 кН.

Создана также подъемная лебедка ЛПТ-8, модификация установки УПТ-32, в отличие от которой она не имеет собственной вышки. Подъемная лебедка смонтирована на гусеничном тракторе и применяется при ремонте скважин, оборудованных стационарными вышками (рис.1.4). Номинальная грузоподъемность - 320 кН.

Подъемная лебедка ЛПТ-8



- 1 - рама; 2 - топливный бак; 3 - воздушные баллоны;
4 - компрессор; 5 - кабина оператора; 6 - лебедка;
7 - карданный вал; 8 - консольная рама; 9 - коробка передач.

Рис.1.4.

Подъемная установка УПТ-50 предназначена для производства спуско-подъемных операций и привода ротора в процессе ремонта и освоения нефтяных и газовых скважин глубиной до 3500 м. Установка самоходная, смонтирована на гусеничном тракторе. Номинальная грузоподъемность - 500 кН.

На промыслах эксплуатируются также ранее выпускавшиеся установки АЗИНМАШ-43П, АЗИНМАШ-43А и др.

Сравнительные показатели назначения подъемных установок приводятся в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Сравнительные показатели назначения подъемных установок

Марка подъемной установки	Номинальная грузоподъем- ность, кН	Скорость подъема, м/с		Высота от земли до оси кронблока, м	Мощность двигателя, л.с.
		наименьшая	наибольшая		
АЗИНМАШ-37А	320	0,34	1,45	18	176,5
ЛПТ-8	320	1,13	5,35		117,6
УПТ-32	320	0,28	1,34	18	117,6
АЗИНМАШ-43П	280	1,08	4,75		92,0
АЗИНМАШ-43А	320	0,27	1,19	18	117,6
УПТ-50	500	0,20	0,90	19	117,6

В цикле подземного ремонта скважин подъемные установки участвуют в выполнении следующих операций: подъем колонны, свинчивания-развинчивания, перенос труб, спуск-подъем элеватора, бурение и др.

Основным видом работ по разобщению пластов при бурении и ремонте скважин является крепление скважин с применением цементирования. Технологический процесс цементирования осуществляется при тесном взаимодействии группы нефтепромыслового оборудования, включающей насосные и смесительные установки, блок манифольда и осреднительные емкости.

В настоящее время в тампонажных конторах наибольшее распространение получили насосные установки ЦА-320А и ЗЦА-400А, предназначенные для приготовления тампонажных растворов и нагнетания готового раствора в скважину. Основной частью устано-

вок является цементирувочный насос с наибольшим давлением нагнетания соответственно 32 и 40 МПа.

Техническая характеристика и основные показатели назначения насосных установок, нашедших наибольшее применение на промыслах республики, приведены в табл. 1.2.

Для промывки песчаных пробок в скважинах разработаны насосные установки УНБ1-100х250, УН1Т-100х250, УНБ1Р-100х250 (соответственно на автошасси, тракторе и рамном основании), а также оборудование для соляно-кислотной обработки призабойной зоны скважин: УНЦ1-160х50К на автошасси и УНЦ1Р-160х50К на рамном основании.

В установке УНБ1-100х250 давление нагнетания промывочной жидкости увеличено до 25 МПа. Установка комплектуется трех-плунжерным насосом и мерным баком, что позволяет замерять количество перекачиваемой насосом жидкости.

В зависимости от сложности применяемой технологической схемы изменяется состав оборудования и, следовательно, затраты на периодический демонтаж и монтаж оборудования. Например [18, 51], технологический процесс цементирования скважин осуществляется по системе тесного взаимодействия группы оборудования, включающего насосные и смесительные установки, блок мани-фольда и осреднительные емкости.

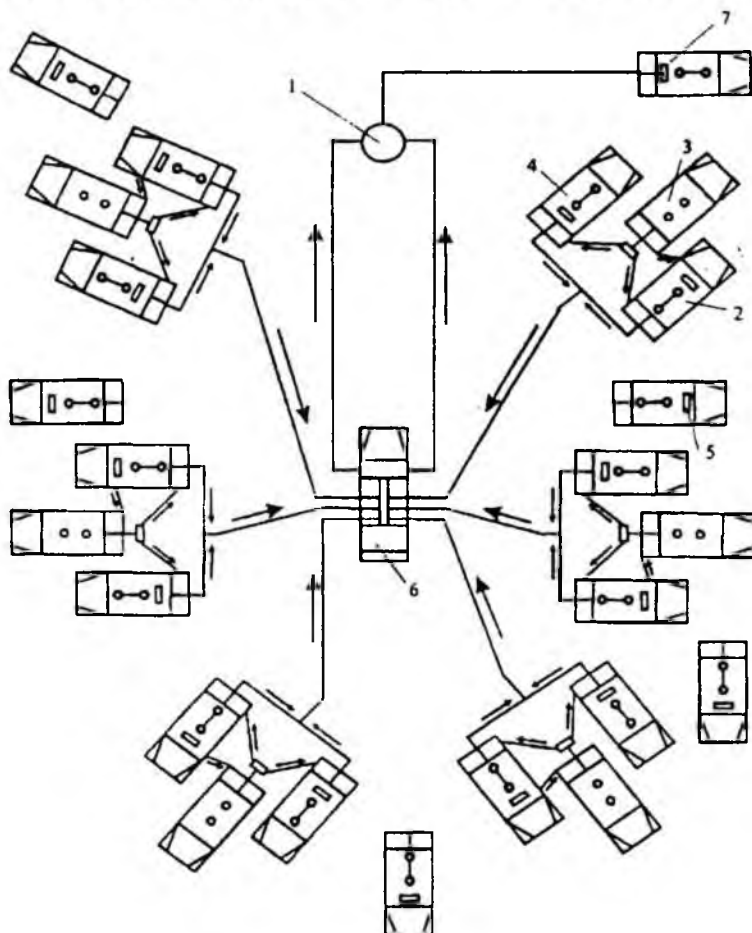
Таблица 1.2.

Характеристика основных параметров насосных установок, применяемых для цементирования скважин

Модель установки	Длина хода поршня (плунжера), мм	Диаметры сменных цилиндрических втулок (плунжера), мм	Предельное давление, МПа	Наибольшая теоретическая подача, л/с
ЦА-320А	250	100	32,0	13,0
		115	23,0	17,4
		125	18,5	21,8
ЗЦА-400А	200	110	40,0	21,6
		125	30,0	28,7
		140	25,0	36,5

На рис.1.5 приведена одна из типовых схем монтажа наземного оборудования, применяемая при цементировании глубоких скважин. Как видно, функциональная схема делится на ряд подсистем, обвязки которых при монтаже посредством блока манифольда соединяются с устьем скважины.

Схема обвязки установок при цементировании глубоких скважин



1 - скважина; 2, 4 - насосные установки; 3 - цементосмесительная установка; 5 - запасная насосная установка; 6 - блок манифольда; 7 - насосная установка предназначенная для продавки разделительной пробки

Рис. 1.5.

Основным недостатком применяемых в настоящее время на промыслах республики насосных и других установок является их недостаточная надежность, не отвечающая требованиям условий эксплуатации - низкий уровень безотказности деталей гидравлической части насосов: плунжеров, поршней, цилиндрических втулок, клапанов, уплотнительных элементов.

Относительно высокую безотказность имеют скважинные штанговые насосы, станки-качалки, фонтанная арматура и некоторые другие виды нефтепромыслового оборудования, конструкции и технология изготовления которых достаточно отработаны.

1.2. Особенности условий эксплуатации нефтепромыслового оборудования

Конструктивно-технологические особенности нефтепромыслового оборудования определяются условиями бурения скважин и добычи нефти и газа. Отмечаются характерные, крайне неблагоприятные условия эксплуатации:

- явно выраженная специфичность эксплуатационно-технологических функций, связанная с подъемом жидкости из скважин, обработкой призабойной зоны, ремонтными работами на скважинах и прочими операциями;
- рассредоточенность точек эксплуатации и ремонтных баз, сложные условия транспортирования оборудования;
- высокий уровень воспринимаемых нагрузок;
- неблагоприятные условия эксплуатации, выражающиеся в абразивности и коррозионности среды, нестационарности режимов нагружения, больших колебаний температуры.

Одной из наиболее специфических особенностей нефтепромыслового оборудования является монтаж машин и агрегатов на месте эксплуатации.

Состав монтажа (комплекса работ, включающих сборку на месте эксплуатации машин и агрегатов, их установку в рабочее положение и соединение в технологические линии, а также выполнение вспомогательных, пригоночных и других операций) нефтепромыслового оборудования обусловлен характером предназначенных функций и конкретными их проектными особенностями.

Как видно из приведенной на рис.1.6 маршрутной схемы, периодический повторный демонтаж-монтаж с транспортированием оборудования с точки на точку имеет значительные организационно-технические и технологические особенности.

Маршрутная схема технологических процессов стационарного и периодического повторного монтажа оборудования



Рис. 1.6.

Сложными и трудоемкими являются работы по перевозке, монтажу и демонтажу агрегатов современных буровых установок для глубокого эксплуатационного и разведочного бурения на нефть и газ, так как масса отдельных их агрегатов (буровой вышки, лебедки главного подъема, силового привода, трансмиссий, буровых насосов и др.) составляет десятки тонн.

Для обеспечения необходимой точности относительного положения и монтажа агрегатов в короткие сроки, необходимо применять специальные методы, технологические приемы и средства механизации. Так, в зависимости от назначения и проектной глубины скважин, климатических и дорожных условий, конструкции и схемы компоновки установок применяют крупноблочный, мелкоблочный или расчлененный (индивидуальный) способы монтажа буровых установок. Для этого предусмотрены соответствующие монтажно-компоновочные схемы деления установок на блоки, различные средства механизации для ускорения монтажных работ и т.д.

После окончания бурения определенной скважины оборудование демонтируется, перебазировается на другую точку и вновь подвергается монтажу. Тем самым одна из ответственных технологических операций - общая сборка и монтаж - многократно осуществляется в малоприспособленных производственных условиях, нередко при неблагоприятных погодных условиях и недостатке необходимых средств механизации, технологического оснащения, контрольно - измерительных приборов и др.

Монтаж оборудования для добычи нефти и газа также имеет ряд особенностей. Значительная часть нефтегазодобывающего оборудования эксплуатируется на открытом воздухе и устанавливается капитально на достаточно длительный срок (станки-качалки, фонтанная арматура и др.). Этапы монтажа основного оборудования для добычи нефти и газа подробно рассмотрены, например, в работе [18].

Определенный период времени оборудование может находиться в ремонте и резерве. Поэтому характерной особенностью эксплуатации нефтепромыслового оборудования является его оборачиваемость, т.е. последовательное пребывание на всех перечисленных выше стадиях строительства нефтяных и газовых скважин. Оборачиваемость оборудования с учетом отдельных стадий строительства скважины определяется коэффициентом оборачиваемости оборудования, показывающим соотношение между списочным и находящимся в работе парком оборудования.

Другой характерной особенностью нефтепромыслового оборудования является сложность его восстановления в эксплуатации, включающее идентификацию отказа (определение его места и характера), замену отказавшей детали или сборочной единицы, регулирование и контроль работоспособности агрегата в целом. Так как оборудование в процессе функционирования непрерывно подвергается воздействию внешней среды, то оно естественно нуждается в периодическом техническом обслуживании и ремонте с целью восстановления работоспособности.

На рис.1.7 представлена маршрутная схема обращения оборудования, подвергаемого периодическому повторному демонтажу - монтажу. Наглядно видна организационно-техническая особенность эксплуатации, и в том числе системы технического обслуживания (ТО) и текущих ремонтов (ТР) в данном случае, по сравнению со стационарным монтажом оборудования. Эти различия особенно проявляются в период разборки и демонтажа оборудования, транспортирования его и монтажа на новой точке.

Как видно из рис.1.7, при демонтаже составляется карта обнаруженных повреждений и отказов, которая затем дополняется в случае повреждений деталей при транспортировке. Уровень ремонтпригодности оборудования в части возможности обнаружения повреждений и отказов при этом значительно выше, чем в условиях эксплуатации, так как при демонтаже с разборкой определенных соединительных звеньев улучшается доступ к деталям и сборочным единицам.

Характерным для ряда видов ремонтно-восстановительных работ на нефтяных и газовых скважинах являются периодически повторяющиеся вспомогательные работы, которые вызываются необходимостью перебазировки передвижных установок, выполнения в определенном объеме сборочно-разборочных и монтажно-демонтажных работ при подготовке к выполнению и разборочно-сборочных и демонтажно-монтажных работ при завершении технологического процесса ремонта.

Отмеченные особенности эксплуатации бурового и нефтепромыслового оборудования выдвигают повышенные требования к его безотказности, ремонтпригодности и монтажепригодности, в том числе в части качественного выполнения технического обслуживания, текущих и агрегатно-узловых ремонтов, а также обеспечения запасными частями.

Маршрутная схема обращения оборудования, подвергаемого периодическому демонтажу-монтажу



Рис.1.7.

1.3. Принцип системности - решающий фактор формирования и управления надежностью*)

Современное машиностроительное изделие, его потребительские достоинства формируются последовательно на этапах исследования, проектирования, производства и эксплуатации. Ошибки, допущенные на любом этапе, приводят к снижению уровня эксплуатационных показателей, а следовательно, и качества. Поэтому в настоящее время, когда проблема качества рассматривается как междотраслевая и общегосударственная, необходим принципиально новый метод формирования качества продукции.

Качество - это совокупность свойств изделия, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением в течение оптимально установленного времени.

На этапе исследования качество будущего изделия определяется степенью достоверности и полнотой научных выводов, устанавливающих определяющие условия и направления проектно-конструкторских разработок. При проектировании качество обуславливается техническим уровнем проектно-конструкторской документации, степенью учета прогнозируемых показателей качества в проекте; на стадии производства - качеством сырья, материалов, полуфабрикатов, деталей и узлов, организацией и состоянием технологических процессов.

На наиболее важном этапе - при эксплуатации, качество изделия определяется его способностью удовлетворять функциональным требованиям надежности: безотказности, долговечности, ремонтнопригодности, монтажепригодности и сохраняемости.

Таким образом, в перечисленной совокупности свойств, определяющих качество, надежность изделия занимает одно из первостепенных по важности мест.

Проблема обеспечения необходимого уровня надежности, обусловленная процессами создания и использования изделия, сложна и многогранна, а во взаимосвязи и взаимообусловленности всех влияющих факторов выявляется необходимость их регулирования (управления). Применительно к проблеме надежности сущность задачи управления, в конечном счете сводится к созданию продукции с такими свойствами, которые бы в максимально возможной степени удовлетворяли потребности при минимальных затратах средств и труда.

*) Раздел написан совместно с С.В. Керимовой.

Содержание процесса управления надежностью сводится к проведению следующих последовательных и взаимосвязанных действий:

- изучению управляемого объекта (природы надежности данного изделия, механизма его формирования и средств воздействия);
- выработке оптимальной стратегии управления (разработке эффективных методов обеспечения, повышения и сохранения уровня надежности, его планирования и прогнозирования);
- реализации выработанной стратегии управления надежностью.

Совокупность отмеченных упорядоченных и целенаправленных действий над надежностью, как объектом управления, является составной частью общей системы управления качеством продукции.

Именно системный подход позволяет рационально реализовать различные методы управления: экономические, социальные, организационные, расчетно-аналитические и другие. Каждый из них характеризуется определенным способом и средствами воздействия на надежность, в том или ином объеме используется на различных уровнях и этапах управления и формирования свойств продукции.

Управление надежностью продукции - это установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня свойств продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации (или потреблении), осуществляемые путем систематического контроля и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на надежность продукции.

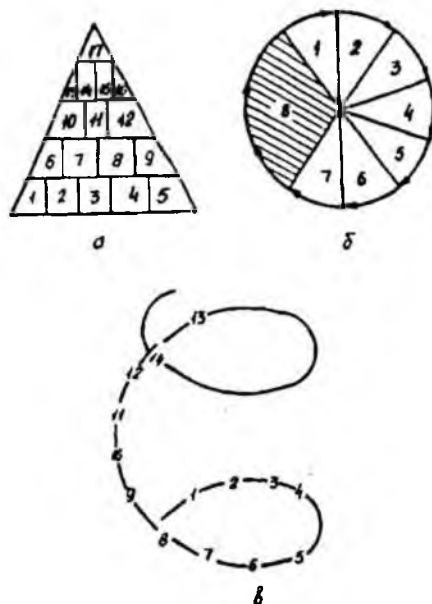
За рубежом разработаны и используются различные системы управления качеством, для которых характерно обеспечение качества продукции на всех стадиях создания изделия - от проектирования до обслуживания в эксплуатации, а также наличие централизованной службы управления качеством.

На рис.1.8 приведены в виде примера отдельные графические модели. Так, американским обществом по контролю качества был предложен треугольник комплексного контроля качества (рис.1.8а), основной смысл которого состоит в изображении последовательного осуществления комплекса мероприятий, приближающих достижение конечной цели, указанной в вершине треугольника.

А.Эттингером и А.Ситтигом предложена графическая модель комплексного контроля качества, изображающая систему работ по замкнутому циклу в виде круга, разделенного на восемь секторов (см.рис.1.8б). Дальнейшее развитие круг качества получил в "спирали развития качества", разработанной М.Джураном (см. рис.1.8 в). Разомкнутость круга и наличие спирали подчеркивают

диалектическую изменчивость взглядов на проблему качества, непрерывное развитие требований и совершенствование методов управления качеством. С этой точки зрения данная модель представляется более прогрессивной.

Схемы моделей управления качеством



а - треугольник комплексного контроля качества:

1-выбор методов контроля качества; 2-оценка поставок разных поставщиков; 3-контроль измерительных приборов; 4-разработка планов приемки материалов и оборудования; 5-оптимизация стоимости качества; 6-планирование системы обеспечения качества; 7-испытания прототипов изделий, определение уровня их надежности; 8-исследование эффективности разных методов контроля; 9-анализ стоимости качества; 10-разработка технологии контроля качества; 11-обратная связь и контроль качества; 12-разработка системы сбора информации о качестве; 13-контроль новых проектов; 14-входной контроль материалов; 15-контроль производственных процессов и изделий; 16 - анализ производственных процессов; 17-комплексный контроль качества;

б - круг качества:

1-цели и задачи; 2-техническое задание; 3-проектирование; 4-производство; 5-сбыт; 6-гарантийное обслуживание; 7-реализованная продукция; 8-сфера сбыта рынка;

в - спираль развития качества:

1-обследование рынка, исследование эксплуатационных показателей изделий; 2-составление проектных заданий для изготовления изделий улучшенного качества; 3-проектно-конструкторские работы; 4-составление технических условий для процесса производства изделий; 5-разработка технологии и подготовка производства; 6-приобретение материалов, комплектующих деталей и изделий, технологического оборудования и инструмента; 7-изготовление инструмента, приспособлений и контрольно-измерительных приборов; 8-процесс производства изделий; 9-технический контроль в процессе производства; 10-технический контроль готовых изделий; 11-испытание рабочей характеристики изделий; 12-сбыт; 13-техническое обслуживание в процессе эксплуатации; 14-обследование рынка, исследование эксплуатационных показателей продукции.

Рис. 1.8.

В Японии системы управления качеством базируются на принципах обеспечения высокого технического уровня и качества еще на стадиях отработки конструкции и технологии изготовления. Особое внимание во всех системах контроля качества уделяется исключению повторяющихся отказов путем осуществления мероприятий по их устранению.

Наглядной графической моделью, отражающей причинно-следственные связи отказов, является модель "рыбий скелет", предложенный проф. Исикавой [33]. В этой модели конечный результат (показатель надежности, внешнее проявление отказа, критерий отказа) изображается центральной стрелкой. Явления (факторы, принципы), влияющие на результат, изображают стрелками, направленными к центральной линии.

Большая часть систем базируется на научно обоснованной организационной структуре управления, методах управления технологическими процессами, техническим контролем, системой информации о качестве продукции, моральным и материальным стимулированием. Однако, в этих системах управления качеством, определяющее свойство изделий, надежность, не выделяется в самостоятельную подсистему.

Специфика конструкций и эксплуатации нефтепромыслового оборудования предопределяет особенности системы управления их качеством и надежностью. Условия эксплуатации нефтяных и газо-

вых скважин весьма разнообразны и неблагоприятны: они отличаются нестабильностью режимов нагружения, высоким уровнем нагрузок, длительным воздействием атмосферных осадков, температуры и др. Вместе с тем многочисленность и специфика эксплуатационных функций обуславливает многообразие и сложность конструкций, преимущественно металлоемких и крупногабаритных.

Для производства нефтепромыслового оборудования характерно наличие многочисленной номенклатуры изделий и преобладание средне- и мелкосерийного производства.

Специфика производства и эксплуатации нефтепромыслового оборудования определяет особенности отраслевой системы управления надежностью, базирующейся, однако, на основополагающих принципах действующих систем управления качеством. К этим особенностям относятся: акцентирование роли предпроектного и проектно-конструкторского этапов, а также этапа эксплуатации оборудования у потребителя; формирование необходимого уровня надежности; совершенствование и развитие производственно-технологической базы предприятий, обеспечивающих соблюдение при изготовлении требований технической документации; развитие координированных научных исследований по сбору и анализу информации об отказах, прогнозированию и планированию работ по повышению надежности нефтепромыслового оборудования.

На рис.1.9 представлена графическая модель, изображающая цикл развития качества (надежности) по гипоциклоиде.

Такая модель и разработанная на ее основе система поэтапного формирования качества [16] наиболее соответствует условиям и особенностям нефтепромыслового машиностроения. Совокупность всех работ организуется и выполняется во времени по закону гипоциклоиды, образующей характерные петли. Комплекс работ, замкнутых в одну петлю, составляет определенный этап, осуществление которого представляет собой законченное и обязательное звено в общем цикле работ.

Первый *предпроектный* этап характеризуется значительным объемом теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление оптимальных характеристик и требований к будущему изделию, и состоит из следующих стадий (см. рис.1.9): исследования эксплуатационной надежности и причин отказов; оценки, прогнозирования и оптимизации качества и надежности; составления карты технического уровня, разработки и утверждения технического задания на проектирование.

дукции, развитие тенденций спроса на нее, объем ее производства к концу прогнозируемого периода. Как показывает опыт изготовления нефтепромыслового оборудования, эти данные оказывают решающую роль в принципиально правильной ориентации проектно-конструкторских разработок и производственных ресурсов.

Техническое прогнозирование основных функциональных и технико-экономических показателей, включающих показатели качества и надежности.

Цель - определение наиболее прогрессивных моделей, тенденций их совершенствования с учетом новых требований потребителя, а также исходя из общих научно-технических прогнозов развития собственной и смежных отраслей. Выявляются и учитываются также экономические и географические факторы, зарубежный опыт и т.п.

Определение наиболее вероятных количественных значений показателей качества и надежности, которые могут быть достигнуты к концу прогнозируемого периода.

Важным результатом предпроектного этапа является создание технического задания на проектирование - основного исходного документа для разработки изделия, в котором в том числе указываются необходимые значения количественных показателей надежности.

На *проектно-конструкторском* этапе разработчик на основе исходных требований, условий применения, тенденций развития проводит необходимые опытно-конструкторские работы, включая патентные исследования, и прогрессивные методы проектирования. Качество и надежность разрабатываемого изделия на этом этапе формируется постепенно по мере развития проекта и обусловлено главным образом качеством самого проекта.

Это возможно при условии выполнения следующих стадий проекта (см.рис.1.9): расчетно-аналитической подготовки обеспечения конструкторско-технологической преемственности экспертизы проектов технической документации; разработки и создания опытного образца; испытания опытного образца (в том числе определительных испытаний на надежность).

Расчетно-аналитическая подготовка проекта включает: выполнение необходимого комплекса расчета основных технических (кинематических, эксплуатационных) показателей, расчетов на прочность, надежность, по обеспечению взаимозаменяемости и точности, технико-экономических обоснований и др.

Объем требуемых расчетов в каждом конкретном случае обусловлен конструкцией и назначением изделия, характером стоящей задачи и другими факторами.

На этом этапе необходим не только структурный анализ и проектный расчет на надежность, но и исследование безотказности изделия-аналога путем тщательного изучения причин отказов сборочных единиц и агрегатов. Необходима также оценка ремонтно-и монтажепригодности, а в отдельных случаях и сохраняемости объекта.

Третья петля гипоциклоиды (см.рис.1.9) символизирует *пред-производственный* подготовительный этап, предшествующий началу производства изделия. Основная задача этого этапа, переходного от проектирования к изготовлению - технологическая подготовка производства.

Качество и надежность изделия на этом этапе обусловлено полнотой и качеством выполнения подготовительных работ, основными из которых являются: анализ результатов испытания опытных образцов, конструкторско-технологическая отработка изделия, технологическая подготовка производства, разработка прогрессивной технологии изготовления, оснащение операций технологической и контрольной оснасткой.

Основная задача предпроизводственного этапа - установление взаимосвязи конструкции изделия с технологией его производства. Поэтому по результатам анализа отрабатывается конструкция на соответствие в первую очередь требованиям функционирования (мощность, производительность, скорость), прочности, жесткости, надежности и затем требованиям технологии производства.

При отработке изделий на технологичность на данной стадии решаются следующие вопросы:

- сокращения трудоемкости подготовки изделия к функционированию;
- повышения коэффициента использования материалов;
- обеспечения устойчивости эксплуатационных качеств изделия, предусмотренных техническим заданием;
- обеспечения простоты обслуживания при эксплуатации с соблюдением требований техники безопасности;
- сокращения трудоемкости и удобства проведения ремонтных работ, возможности применения типовых технологических процессов технического обслуживания и ремонта;
- сокращения номенклатуры и количества запасных частей, требуемых для обеспечения надежной работы;

- обеспечения оптимальной массы и транспортабельности изделия.

Самостоятельной задачей является обеспечение ремонтной технологичности (РТ) конструкции. Требования к РТ зависят от конструктивных особенностей изделия, его функциональных свойств, эксплуатационных условий, уровня безотказности и долговечности деталей и сборочных единиц, условий выполнения ремонтов и пр.

Характеристики РТ конструкции оцениваются по облегченности доступа к деталям и сборочным единицам, что особенно важно для изделий с невосстанавливаемыми деталями, которые в случае отказа следует заменить.

Подробно разработанная методика оценки РТ излагается в разделе 6.

Рассматривая изделие как объект эксплуатации, необходимо учитывать приспособленность изделия к использованию и сокращению трудоемкости, подготовку к функционированию и контролю работоспособности: удобство и сокращение трудоемкости технического обслуживания и ремонтных работ; обеспечение требований техники безопасности; транспортабельность.

Таким образом, на предпроизводственном этапе завершается процесс отработки проектируемого изделия, совершенствование которого может продолжаться в процессе его серийного производства.

Решающим и ответственным в формировании качества изделия является *производственный этап* от которого зависит, в какой степени будут реализованы в готовом изделии предусмотренные проектом качественные показатели. Обеспечение и развитие качества здесь идет по следующим направлениям (стадиям) (см.рис.1.9): входной контроль технологической точности оборудования и оснастки; статистический анализ технологических операций; соблюдение технологической дисциплины; аттестация продукции; организация приемочных (определятельных или контрольных) испытаний.

Качество машиностроительных изделий в процессе производства определяется главным образом точностью и стабильностью технологического процесса, которые в свою очередь обусловлены точностью применяемого оборудования, уровнем технологического процесса, соблюдением технологической дисциплины.

Длительный производственный цикл формирования качества завершается процессом испытания готового изделия. С точки зрения

оценки качества сборочный процесс отличается от других производственных процессов, качество выполнения которых может быть проконтролировано измерительными приборами, косвенными методами, визуально. Объективный контроль качества и надежности собранного изделия возможен только при испытании его в условиях близких к эксплуатационным. Высокий технологический уровень приемочных испытаний не только гарантирует высокое качество и надежность выпускаемой продукции и благодаря этому повышает престиж предприятия, но и прямым образом повышает эффективность производства.

Объем и режим приемочных испытаний устанавливается исходя из особенностей эксплуатации изделия на основе ТУ и стандартов.

Послепроизводственный этап. С завершением производственного этапа заканчивается процесс формирования качества. После сдачи собранного изделия на склад готовой продукции начинается период сохранения достигнутого уровня качества. Этот период может быть разделен на две части: до начала эксплуатации и эксплуатация.

Задача послепроизводственного этапа состоит в наиболее полном сохранении уровня качества до ввода изделия в эксплуатацию. Здесь следует отметить следующие стадии (см.рис.1.9): консервация и хранение, транспортировка, разработка и обеспечение изделия эксплуатационной документацией.

Для нефтепромыслового оборудования, подверженного воздействию различных факторов окружающей среды, вопросы правильного хранения и консервации исключительно важны. Нормальное функционирование многих видов нефтепромыслового оборудования обусловлено качеством выполнения именно этих предохранительных операций.

Наиболее ответственна с точки зрения сохранения качества транспортировка нефтепромыслового оборудования. Это объясняется спецификой конструкций этих изделий, а именно, большими габаритами и массой, недостаточной жесткостью (скважинные насосы, штанги, фонтанная арматура в сборе, вышки), большим числом независимо транспортируемых составных частей, образующих комплексы (станки-качалки, нефтепромысловые установки).

Эксплуатация оборудования. Заключительным этапом в общем цикле формирования и проявления качества изделия является его функционирование в эксплуатации.

На этом этапе сохранение заложенного в изделии уровня качества достигается созданием необходимых условий, которые, удовлетворяя требованиям эксплуатации, обеспечивали бы стабильность уровня качества в течение всего периода работы изделия.

Основным критерием правильности эксплуатации и обслуживания изделия потребителем является достижение гарантированных показателей надежности (наработка на отказ, средний ресурс, средний срок службы).

Сохранение достигнутого уровня качества изделия в течение всего периода эксплуатации обусловлено выполнением следующих мероприятий (см.рис.1.9): подготовка обслуживающего персонала; проведение в соответствии с установленным порядком технического обслуживания и ремонта; подготовка и создание материально-технических средств и обеспечение технического обслуживания; организация службы наблюдения за оборудованием, накопление статистической информации об отказах.

Отдельные этапы и стадии гипоциклоидальной модели, применительно к изделиям нефтяного машиностроения, подробно изложены в работе [16]. Эффективность применения данной модели нашло отражение и в фундаментальных трудах зарубежных авторов (например, в [22]).

Графы, характеризующие каждый из этапов цикла, по своей сущности сходны с циклическими графами технологического наследования. В виде примера соответствующий граф, как составная часть гипоциклоидальной модели, приведен на рис.1.10. Граф, рассматриваемый в направлении стрелок от А до F, представляет собой предпроектный этап формирования надежности проектируемого объекта, начало и конец которого характеризуются соответственно ребрами А - В и Е - F. Начало и конец ребер указывают на следующие результаты выполняемых по этапам разработок в сфере проектирования, производства и эксплуатации. В данном графе это А - результаты анализа технической документации изделия-аналога: $A_{(1)}$ - по применяемым материалам и видам упрочняющей обработки; $A_{(2)}$ - по точности обработки; $A_{(3)}$ - по отклонениям формы поверхностей; $A_{(4)}$ - по качеству поверхностей; $A_{(5)}$ - по напряжению поверхностных слоев металла; $A_{(6)}$ - по структуре поверхностных слоев.

В - результаты анализа данных об отказах при контрольных испытаниях изделия-аналога: $B_{(1)}$ - по ресурсу и уровню безотказности и долговечности; $B_{(2)}$ - по расходу запасных частей.

С - результаты анализа данных по изделию-аналогу: по ремонтпригодности ($C_{(1)}$); монтажепригодности ($C_{(2)}$) и сохраняемости ($C_{(3)}$). D - результаты обследования изношенных деталей изделия-аналога ($D_{(1)}$). E - итоги проведенных поисковых и исследовательских разработок ($E_{(1)}$). F - разработка программ и мероприятий по обеспечению необходимого уровня надежности: $F_{(1)}$ - конструкторских; $F_{(2)}$ - технических; $F_{(3)}$ - технологических; $F_{(4)}$ - организационных; $F_{(5)}$ - эксплуатационных.

Как видно из рис.1.10, последовательность выполнения предпроектных разработок характеризуется значительным объемом теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление оптимальных характеристик и требований к будущему изделию.

Циклический граф технологического и эксплуатационного наследования на предпроектном этапе

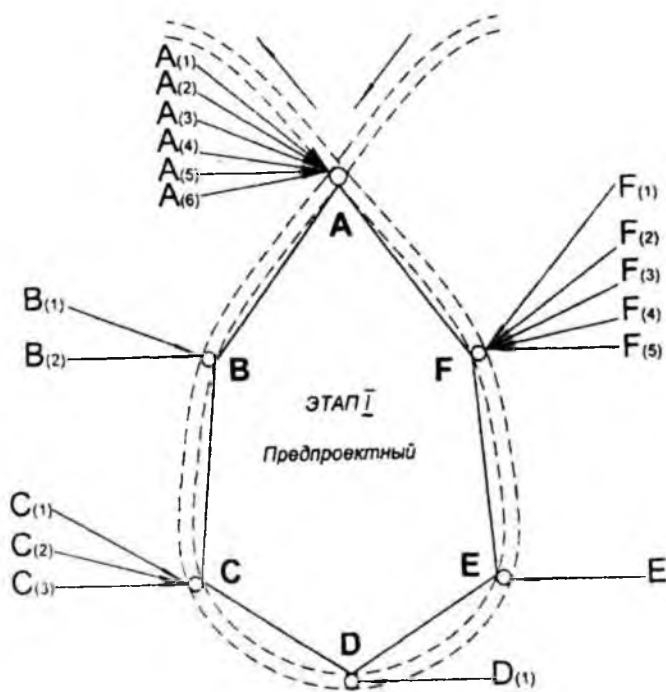


рис.1.10.

Свойства любого изделия проявляются в процессе его эксплуатации. Какими бы начальными свойствами ни обладало изделие, в процессе эксплуатации имеет место накопление необратимых изменений в деталях и сопряжениях. Эти изменения порождаются износом, деформациями, коррозией и т.д. В одном механизме и даже в одной детали эти процессы налагаются, взаимодействуют и в конечном счете вызывают предельно допустимое изменение рабочих характеристик и приводят к отказу.

В этих условиях всестороннее решение проблемы поддержания и восстановления работоспособности объекта возможно только на основе системного, а следовательно, и научного подхода. Системный подход предусматривает такую организацию выполнения работ, при которой реализуются основные принципы управления, т.е. упорядоченного и целенаправленного воздействия на объекты: диагностирование, техническое обслуживание и восстановление на всех уровнях и стадиях функционирования системы. Системный подход заключается также и в научно обоснованном анализе и оценке своевременного потребного ремонта, его структуры и технологии, в комплексном изучении его технического уровня и организации, исполнения и экономики с позиций обеспечения постоянной исправности объекта для заданных условий эксплуатации при минимальных затратах трудовых и материальных ресурсов.

Таким образом, с учетом назначения и структуры (состава) объекта процесс его технической эксплуатации можно представить как последовательную во времени смену различных состояний. Применительно к буровому и нефтепромысловому оборудованию к ним можно отнести: монтаж на точке эксплуатации; приведение в состояние готовности к эксплуатации; использование по назначению; периодическое выполнение диагностирования; состояние ожидания технического обслуживания (ТО); плановые и неплановые текущие ремонты (ТР), агрегатно-узловые и капитальный ремонты. Кроме того, для отдельных видов оборудования характерны: демонтаж объекта после завершения эксплуатации на точке; транспортирование; подготовка к монтажу на новой точке или поступление агрегатов или установки в целом в резерв; хранение или поступление их в любое из выделенных состояний на различные точки эксплуатации. Большая разбросанность точек эксплуатации, постоянная подвижность установок и другие особенности производственного процесса определяют требования, предъявля-

емые к эксплуатационной технологичности, и специфику оценки надежности применяемого оборудования.

При большом числе состояний изображение стохастического процесса в виде двумерной графической зависимости становится неудобным. Для этого предложена компактная графическая интерпретация рассматриваемого процесса в виде графа состояний и переходов процесса технической эксплуатации объекта, подвергающегося при этом обслуживанию и ремонту.

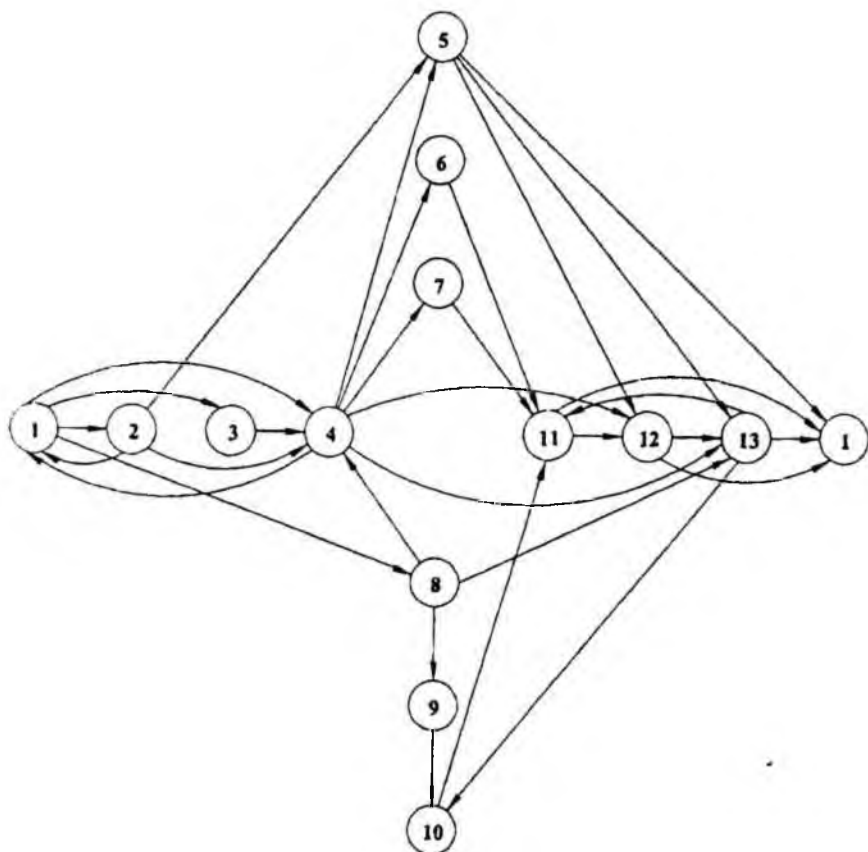
С учетом отмеченного на рис.1.11 приведен разработанный применительно к сложным объектам граф состояний и переходов каскадного типа (с прямыми и обратными связями) процесса технической эксплуатации оборудования на примере установок для бурения глубоких скважин на нефть и газ, показывающий в общем виде все особенности их эксплуатации.

Основные закономерности процесса технической эксплуатации объекта-аналога выявляются на основе анализа статистической информации. Кроме того, особое внимание должно уделяться вопросам корреляционного анализа для установления влияния различных факторов на приспособленность объекта к заданному режиму обслуживания с учетом характеристик надежности систем, узлов и агрегатов.

В целом разработанные методические основы формирования надежности изделий машиностроения, на основе замкнутых циклических графов, позволяют непрерывно планировать и выполнять работы по повышению надежности от изделия - аналога к новому изделию, от этапа к этапу. Наряду с этим, полученный граф состояний и переходов процесса технической эксплуатации, на примере сложного объекта - установки глубокого бурения, позволяет раскрыть структуру и характеристику отдельных состояний процесса, смоделировать оперативное техническое обслуживание и ремонтные формы, а при необходимости и периодические демонтажно-монтажные и другие работы.

Таким образом, проблема обеспечения надежности изделий машиностроения, обусловленная процессами их создания и использования, сложна и многогранна, а во взаимосвязи всех влияющих факторов выявляется необходимость их регулирования (управления). При этом одним из важнейших путей обеспечения необходимого уровня надежности является системный подход к исследованию и установлению конечных свойств объекта в зависимости от его свойств на предшествующих этапах.

Каскадный граф процесса эксплуатации оборудования,
применяемого для бурения нефтяных
и газовых скважин



1-пребывание объекта в работе; 2-перерывы, связанные с технологией выполняемых работ; 3-ожидание и выполнение планового ТО и ТР; 4-диагностика и дефектация; 5-ТО и ТР по состоянию с доставкой запасных частей; 6-агрегатно-узловой ремонт; 7-капитальный ремонт; 8-демонтаж оборудования в связи с завершением работы на точке эксплуатации, диагностика и ремонтно-восстановительные работы; 9-доставка оборудования на новую точку эксплуатации; 10-монтаж оборудования на новой точке; 11-предэксплуатационное ТО; 12 - готовность к работе; 13 - пребывание в резерве.

Рис. 1.11.

2. Основные понятия теории надежности

2.1. Термины, определения и характеристики надежности

Термины и основные понятия в области надежности, применяемые в настоящее время в науке и технике, регламентируются руководящим документом РД 26-16-45-97 [46] (табл. 2.1), а также методическими указаниями [13, 14].

Объектами могут быть изделия, системы, а также их подсистемы. В качестве подсистем могут рассматриваться агрегаты, сборочные единицы, отдельные детали, компоненты или элементы.

Объект может находиться в исправном или неисправном, в работоспособном или неработоспособном состоянии.

Исправное состояние - это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние - это состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние - это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние - это состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Понятие "исправное состояние" шире, чем понятие "работоспособное состояние". Если объект исправен, то он обязательно работоспособен, но работоспособный объект может быть неисправным, однако его неисправности при этом не настолько существенны, чтобы нарушать нормальное функционирование объекта.

Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа. Переход объекта из исправного состояния в неисправное работоспособное состояние происходит из-за повреждений.

Повреждение - событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Таблица 2.1.

Термины и определения по РД 26-16-45-97 [46]

Термины	Определения
Надежность	Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения, монтажа и транспортирования. <u>Примечание.</u> Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность, монтажепригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.
Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.
Долговечность	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.
Ремонтпригодность	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.
Монтажепригодность	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности его к монтажу в определенных организационно-технических условиях выполнения работ с минимальными затратами труда и средств, характеризующихся максимальной доступностью, простотой, удобством и способностью объекта выполнять требуемые функции после завершения монтажных работ.
Сохраняемость	Свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, чаще всего из-за наступления предельного состояния.

Предельное состояние - это такое состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, называется критерием отказа.

Если работоспособность объекта характеризуется совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Отказы можно классифицировать по различным признакам, например: по условиям и причинам возникновения, по характеру проявления, по последствиям и др. [6].

Отказы по характеру проявления делятся на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта; постепенный отказ возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа или принять меры по устранению его нежелательных последствий. Однако четкой границы между внезапными и постепенными отказами провести не всегда удастся.

Перебегающий отказ - многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

При анализе надежности различают ранние отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля, и поздние, - деградационные и ресурсные отказы.

Деградационный отказ обуславливается естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при

соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Ресурсный отказ - это отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Вероятность возникновения деградационных отказов в пределах планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса) должна быть достаточно мала. Это обеспечивается расчетами и контрольными испытаниями с учетом фактической природы деградационных отказов, а также надлежащей системой технического обслуживания и ремонта.

С учетом особенностей эксплуатации нефтепромыслового технологического оборудования приняты дополнительные термины: отказ функционирования и отказ срабатывания для отдельных видов нефтепромыслового оборудования, в том числе для технологических установок систем сбора, подготовки и транспортировки продукции (СПТП) морских месторождений.

Под *отказом функционирования* системы принято событие, заключающееся в переходе объекта с одного относительного уровня функционирования на другой, более низкий. Под *отказом срабатывания* понимается отказ функционирования, заключающийся в невыполнении объектом требуемого срабатывания [48].

Обслуживание многих видов нефтепромыслового оборудования связано с пребыванием персонала в непосредственной близости от работающих механизмов, особенно при спуско-подъемных операциях. Это увеличивает вероятность контакта человека с техническим объектом, что может привести к травме обслуживающего персонала вследствие отказа оборудования.

Производственный травматизм происходит из-за отказа оборудования, вызывающего нарушение функциональной целостности. Под функциональной целостностью следует понимать состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Отказы оборудования можно разделить по последствиям их действия на опасные и безопасные.

Выше дается понятие отказа с точки зрения работоспособности объекта. Опасные отказы целесообразно характеризовать с точки зрения функциональной целостности объекта, так как даже работоспособный объект может привести к опасным ситуациям и травматизму.

Таким образом, степень опасности отказов можно сформулировать следующим образом [47].

Опасный отказ - нарушение функциональной целостности объекта, способное привести к опасным ситуациям и травматизму обслуживающего персонала.

Безопасный отказ - нарушение функциональной целостности объекта, не приводящее к опасным ситуациям и травматизму обслуживающего персонала.

Однако, не каждый опасный отказ приводит к травматизму. Следовательно, опасный отказ может быть травмирующим и травмоопасным. Травмоопасный отказ по своей природе аналогичен травмирующему, но по тем или иным причинам не приводит к травматизму.

Травмирующий отказ - нарушение функциональной целостности объекта, приводящее к травмированию.

Травмоопасный отказ - нарушение функциональной целостности объекта, способное привести к травмированию.

Классификация отказов нефтепромыслового оборудования по их последствиям приведена в табл.2.2 [16].

В приведенной в табл.2.2 классификации особо выделены отказы, последствиями которых могут быть человеческие жертвы или травмы обслуживающего персонала, тяжелые аварии с значительным материальным ущербом, загрязнение (или риск загрязнения) окружающей среды.

Для классов надежности, последствиями которых могут быть человеческие жертвы, а также загрязнение окружающей среды, допустимые значения показателей надежности должны быть достаточно высокими, и экономическая эффективность от повышения надежности в этом случае не является основным критерием оптимальности. Для остальных классов надежности основным критерием оптимальности уровня безотказности служит экономическая эффективность.

2.2. Количественные показатели надежности

Количественной характеристикой результатов эксперимента или наблюдения является случайная величина, принимающая различные числовые значения, заранее не известные и зависящие от случайных причин, которые не могут быть полностью учтены.

Существуют случайные величины двух типов: дискретные

Таблица 2.2.

Классификация отказов нефтепромыслового оборудования

Класс надежности	Характеристика отказов	Последствия из-за отказов
I	Полное разрушение сооружений и технологического оборудования из-за глобальной аварии (катастрофы).	Возможные человеческие жертвы. Громадный материальный ущерб.
II	Травмирующие и травмоопасные отказы деталей и узлов основного и вспомогательного оборудования.	Возможные травмы обслуживающего персонала и человеческие жертвы.
III	Внезапные отказы деталей и узлов, обеспечивающих выполнение основных технологических операций.	Тяжелые аварии со значительным материальным ущербом.
IV	Отказы деталей, узлов и защитных устройств технологического оборудования.	Загрязнение (или риск загрязнения) окружающей среды.
V	Отказы основных деталей и узлов, приводящие к досрочной замене оборудования в период эксплуатации.	Длительные простои и досрочная смена (до отработки ресурса) оборудования.
VI	Отказы оборудования вследствие потери работоспособности быстроизнашивающихся деталей и узлов.	Простои оборудования, связанные со сменой быстроизнашивающихся деталей в период выполнения технологических операций.
VII	Отказы деталей, не приводящие к полной потере работоспособности оборудования.	Непродолжительные простои оборудования с незначительным материальным ущербом.

(прерывные) и непрерывные. Дискретная случайная величина может принимать изолированные одно от другого значения, которые можно заранее перечислить.

Непрерывная случайная величина может принимать любые значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка.

Наиболее полно случайные величины могут быть охарактеризованы с помощью функции распределения $F(x)$, представляющей собой вероятность появления значения $X \leq x$:

$$P(X \leq x) = F(x).$$

Зная функцию распределения случайной величины, можно, пользуясь методами специального раздела математической статистики - теории оценок неизвестных параметров, оценивать показатели надежности. Исходными данными для определения функции распределения случайной величины ζ является совокупность конечного числа наблюдений за ней $(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Случайные величины с вероятностной точки зрения будут полностью определены, если известны их функции распределения.

Если ζ случайная величина и x произвольное действительное число, то вероятность того, что ζ примет значение меньше, чем x , называется интегральной функцией распределения или законом распределения вероятностей случайной величины

$$F(x) = P\{\zeta \leq x\}. \quad (2.1)$$

В теории надежности наиболее целесообразно характеризовать время между соседними отказами производной от функции распределения, т. е. плотностью распределения случайной величины или дифференциальной функцией распределения, которая является другой формой задания закона распределения случайной величины

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (2.2)$$

Случайные величины, исследуемые теорией надежности, являются непрерывными случайными величинами, что обуславливает их определение с помощью формул (2.1) или (2.2).

Функция распределения дискретной случайной величины, например, количества отказов или восстановлений ремонтируемого объекта за некоторый конечный период наработки, имеет вид

$$P_i = P(\zeta = a_i),$$

где P_i - вероятность того, что случайная величина примет значение

$$a_i; \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

a_i - возможное значение дискретной случайной величины;

n - число возможных значений случайной величины.

Случайные величины, наряду с функциями распределения вероятностей, могут характеризовать некоторые постоянные числа, получаемые по определенным правилам из функций распределения случайных величин. Такие постоянные числа называются числовыми характеристиками случайной величины. Наиболее важными числовыми характеристиками случайных величин являются: математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины ζ характеризует некоторое, вполне определенное числовое значение, около которого группируются возможные значения случайной величины

$$M[\zeta] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx. \quad (2.3)$$

Так как теория надежности изучает положительные случайные величины, то нижний предел интегрирования в общей формуле для математического ожидания всегда равен нулю. Размерность математического ожидания совпадает с размерностью самой случайной величины.

Математическим ожиданием дискретной случайной величины называют сумму произведений всех ее возможных значений на их вероятности

$$M[\zeta] = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i), \quad (2.4)$$

где n - число возможных разных значений случайной величины ζ .

Для оценки разброса значений случайной величины около ее среднего значения применяются числовые характеристики: дисперсия и среднее квадратическое отклонение. Дисперсия обозначается символом $D[\zeta]$ или $\sigma^2[\zeta]$ и для непрерывных случайных величин определяется как математическое ожидание квадрата отклонений случайной величины от ее математического ожидания

$$D[\zeta] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M\zeta)^2 \cdot f(x) \cdot dx. \quad (2.5)$$

Для дискретных случайных величин дисперсия будет

$$D[\zeta] = \sum_{i=1}^n (x_i - M\zeta)^2 P(x_i). \quad (2.6)$$

Средним квадратическим отклонением называется квадратный корень из дисперсии

$$\sigma[\zeta] = \sqrt{D[\zeta]}. \quad (2.7)$$

Чем больше разбросаны значения случайных величин, тем большими получаются значения дисперсии и среднего квадратического отклонения.

Размерность среднего квадратического отклонения совпадает с размерностью математического ожидания и, следовательно, с размерностью самой случайной величины.

Коэффициентом вариации случайной величины называется отношение

$$v[\zeta] = \frac{\sigma[\zeta]}{M[\zeta]}. \quad (2.8)$$

Для наиболее полной оценки надежности оборудования необходимо применять комплекс показателей, характеризующих его безотказность, долговечность, ремонтпригодность, монтажепригодность и сохраняемость, которые выбираются и определяются с учетом особенностей объекта, режимов и условий его эксплуатации и последствий отказов.

2.2.1. Показатели безотказности

Вероятность безотказной работы. Важным показателем, характеризующим безотказность, является вероятность безотказной работы объекта, под которой понимается вероятность того, что в пределах заданной наработки (продолжительности или объема работы объекта) отказ объекта не возникнет.

Пусть t - время работы данного объекта, а T - случайное время безотказной работы, т.е. время, прошедшее от начала работы до первого отказа. Тогда событие $T > t$ является выражением того, что в течение времени t не произойдет ни одного отказа объекта.

Для каждого значения t существует определенная вероятность того, что T примет значение, большее t , т.е.

$$P(t) = P\{T > t\}.$$

Отсюда видно, что $P(t)$ есть функция от t . Эту функцию называют вероятностью безотказной работы.

Функция $P(t)$ является непрерывной функцией времени, обладающей следующими очевидными свойствами:

а) $P(0) = 1$, т.е. принимается, что в момент начала работы все изделия исправны;

б) $P(t)$ является монотонно убывающей функцией времени;

в) при $t \rightarrow \infty$, $P(t) \rightarrow 0$.

Таким образом, вероятность безотказной работы в течение конечных интервалов времени может иметь значения

$$0 < P(t) \leq 1.$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - P(t); \\ f(t) &= \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Статистически вероятность безотказной работы определяется отношением числа исправно работающих изделий к общему числу изделий, находящихся под наблюдением.

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N} = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (2.10)$$

где N - количество машин исправных в момент времени $t = 0$;

$N(t)$ - количество машин исправных к моменту времени t ;

$n(t)$ - количество отказавших машин к моменту времени t .

Вероятность отказа. Исправная работа и отказ - события противоположные. Поэтому наряду с понятием «вероятность безотказной работы» находит применение другой показатель надежности, «вероятность отказа» - вероятность того, что объект откажет в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени.

Вероятность отказа определяется выражением:

$$q(t) = P\{T \leq t\},$$

из которого видно, что вероятность отказа является функцией распределения случайного времени работы до отказа.

Статистическая оценка вероятности отказа есть отношение числа объектов, отказавших к моменту времени t , к числу объектов, исправных в начальный момент времени $t = 0$. Она определяется по формуле

$$q^*(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (2.11)$$

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа связаны зависимостью

$$P(t) + q(t) = 1. \quad (2.12)$$

Интенсивность отказов. Для оценки изменения безотказности во времени удобным показателем является интенсивность отказов - условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяется формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}.$$

Из определения интенсивности отказов $\lambda(t)$ следует, что

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t,$$

где $f(t)$ - плотность распределения наработки до отказа.

Из этого соотношения имеем

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.13)$$

т.е. формулу для аналитического определения $\lambda(t)$ по известному закону распределения времени безотказной работы.

Если для высоконадежных систем принять $P(t) \approx 1$, то для таких систем интенсивность отказов приблизительно равна плотности распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка интенсивности отказов - отношение числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работавших в рассматриваемом промежутке времени (при условии, что отказавшие объекты не восстанавливались и не заменялись исправными).

$$\lambda^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{[N - n(t)]\Delta t} = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (2.14)$$

где Δt - интервал времени;

$\Delta n(\Delta t)$ - количество объектов, отказавших за время Δt .

Практически должно иметь место условие $N(t) \gg 1$ и $\Delta t \ll 1$.

Интенсивность отказов, как количественная характеристика надежности, позволяет наглядно установить характерные периоды работы объектов. При преобладании в потоке постепенных отказов

(что наиболее характерно для нефтепромыслового оборудования) кривая интенсивности отказов $\lambda(t)$ имеет возрастающий по времени функционирования характер [6]. При преобладании же в потоке внезапных отказов типичная кривая интенсивности отказов $\lambda(t)$ обычно имеет три ярко выраженных характерных участка. Первый участок кривой - от 0 до t_1 - характеризуется относительно высокой интенсивностью отказов. В этот период преобладают в основном внезапные отказы, которые происходят из-за дефектов, вызванных ошибками при проектировании или нарушением технологии изготовления. Этот участок называют периодом приработки.

Второй участок кривой - от t_1 до t_2 характеризуется примерно постоянной интенсивностью отказов и является основным и наиболее длительным за время эксплуатации машин. Внезапные отказы машин в этот период происходят редко. В основном отказы вызываются скрытыми дефектами производства, преждевременным износом отдельных деталей. Этот участок соответствует времени нормальной работы машин. Как будет показано ниже, если имеет место экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы, то для второго участка кривой $\lambda(t)$ между интенсивностью отказов и средней наработкой до отказа $\bar{T}_1$ существует обратная зависимость $\lambda = \frac{1}{\bar{T}_1}$. Например, если для какой-либо машины

$\lambda = 0,001$ 1/час, то средняя наработка до отказа $\bar{T}_1 = 1000$ час.

Третий участок кривой $\lambda(t)$, начинающийся с t_2 , характеризуется значительным возрастанием интенсивности отказов. Основная причина - износ деталей и сопряжений.

Средняя наработка до отказа. Как для восстанавливаемых, так и для невосстанавливаемых объектов одной из важных характеристик безотказности является средняя наработка до отказа - математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

Средняя наработка до отказа $\bar{T}_1$, выражается зависимостью

$$\bar{T}_1 = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt.$$

Средняя наработка до отказа статистически определяется отношением суммы наработок объектов до отказа к количеству наблюдаемых объектов, если они все отказали за время испытаний.

$$\bar{T}_1^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j, \quad (2.15)$$

где N - количество испытываемых (находящихся под наблюдением) объектов;

t_j - наработка j - ого объекта до отказа.

Средняя наработка на отказ. Для восстанавливаемых объектов применяется количественная характеристика - средняя наработка на отказ $\bar{T}$, которая определяется как отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Определению средней наработки на отказ $\bar{T}$ соответствует формула

$$\bar{T} = \frac{t}{M\{r(t)\}},$$

где t - суммарная наработка; $r(t)$ - число отказов, наступивших в течение этой наработки;

$M\{r(t)\}$ - математическое ожидание этого числа.

Средняя наработка на отказ статистически определяется отношением суммарной наработки восстанавливаемых объектов к суммарному числу отказов этих объектов.

$$\bar{T}^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N t_j. \quad (2.16)$$

Если испытываются N изделий, то средняя наработка на отказ

$$\bar{T}^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^N t_{ji} \right), \quad (2.17)$$

где n_j - количество отказов j - го изделия за рассматриваемый промежуток времени.

Для определения меры рассеивания наработок до отказа и на отказ необходимо применять среднее квадратическое отклонение наработок.

Знание одной из функций $p(t)$, $q(t)$, $\lambda(t)$, $f(t)$ дает возможность определить три остальные, а также среднюю наработку на отказ $\bar{T}$ [6].

Параметр потока отказов. При эксплуатации ремонтируемых изделий после возникновения каждого отказа эти изделия

ремонтируются или заменяются идентичными, при этом моменты возникновения отказов t_i являются случайными величинами.

Основной количественной характеристикой потока отказов является его параметр. Если $U(t, \tau)$ - вероятность того, что за промежуток времени τ произойдет по крайней мере один отказ, при условии, что изделие проработало время t , то параметр потока отказов определится как предел:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{U(t, \tau)}{\tau} = \omega(t),$$

если он существует.

Статистическая оценка параметра потока отказов - это отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки:

$$\omega^*(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t}, \quad (2.18)$$

где Δt - малый отрезок наработки;

$r(t)$ - число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки t .

Разность $r(t + \Delta t) - r(t)$ представляет собой число отказов на отрезке Δt .

В качестве количественной характеристики процесса применяется также функция восстановления $H(t)$, которая определяется как математическое ожидание числа восстановлений в течение заданного времени. Очевидно, что число восстановлений изделия равно числу его отказов $n(t)$. Поэтому можно записать

$$H(t) = M[n(t)]. \quad (2.19)$$

Если $H(t)$ - дифференцируемая функция времени, то функция

$$h(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad (2.20)$$

называется плотностью восстановления.

В теории надежности наибольшее применение получили так называемые простейшие потоки отказов (потоки Пуассона), которые обладают свойствами стационарности, отсутствия последствия и ординарности.

Стационарность потока означает, что вероятность возникновения некоторого числа отказов за интервал времени длительностью Δt зависит от длительности этого интервала, но не изме-

няется от сдвига Δt по оси времени. Если случайный процесс стационарный, то большое число наблюдений над системой в произвольно выбранные моменты времени имеют одни и те же статистические характеристики.

Отсутствие последействия в потоке отказов означает, что вероятность наступления некоторого количества отказов в течение промежутка времени $(t, t + \Delta t)$ не зависит от того, сколько и как появлялись события до момента времени t . В частности, отсутствие последействия означает взаимную независимость появления того или иного числа отказов в непересекающиеся промежутки времени.

Ординарность потока отказов означает, что за малый промежуток времени Δt появление двух и более отказов практически невозможно.

Для любого ординарного потока отказов $\omega(t) = h(t)$. Функция $\omega(t)$ обычно применяется для характеристики потока отказов, а $h(t)$ - для характеристики потока восстановлений.

Допущение, что поток отказов является простейшим потоком случайных событий, не всегда справедливо. Условие стационарности потока отказов нефтепромыслового оборудования соблюдается чаще всего в период его эксплуатации в установившемся режиме. Нестационарными являются потоки отказов оборудования в периоды приработки и интенсивного износа.

В общем случае потоки отказов нефтепромыслового оборудования не удовлетворяют полностью условиям отсутствия последействия.

Во-первых, отказ одной детали чаще всего приводит к перенапряжению других деталей, вследствие чего вероятность отказа последних повышается; во-вторых, в результате замены отказавших деталей у вновь замененных следует ожидать меньшего значения вероятности отказа, чем у деталей, проработавших некоторое время.

Условие ординарности потока отказов нефтепромыслового оборудования в большинстве случаев выполняется, так как отказ одновременно нескольких деталей является, как правило, следствием отказа какой-либо одной детали, и это событие можно рассматривать как один отказ.

Однако на практике для большинства случаев поток отказов нефтепромыслового оборудования после периода приработки можно с определенными допущениями принять простейшим.

2.2.2. Показатели долговечности

Средний ресурс. Ресурс - это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Наработка может измеряться в единицах времени, длины, площади, объема, веса и других единицах.

Математическое ожидание ресурса называется средним ресурсом. Статистическая оценка среднего ресурса определяется по формуле

$$\bar{R}^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j, \quad (2.21)$$

где R_j - ресурс j -го объекта.

Для неремонтируемых объектов ресурс совпадает с продолжительностью пребывания их в работоспособном состоянии в режиме применения по назначению, если переход в предельное состояние обусловлен только возникновением отказа. Суммарная наработка объекта от начала эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, соответствующее окончательному прекращению эксплуатации, является полным ресурсом.

Ресурс является характеристикой среднего уровня долговечности изделий и с учетом среднего квадратического отклонения от крайних (в том числе экстремальных) значений, используется для определения требуемого числа ремонтов изделий при заданном суммарном ресурсе, планирования и расчетов по экономике эксплуатации изделий, оценки технико-экономической эффективности работ по повышению долговечности изделий.

Суммарная наработка объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено независимо от его состояния, называется назначенным ресурсом.

Календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах, называется гамма - процентным ресурсом R_γ .

Гамма-процентный ресурс является одной из наиболее удобных количественных характеристик, облегчающих сопоставление результатов испытаний различных модификаций изделий. Этот показатель применяется для выбора срока гарантии изделий,

определения потребности в запасных частях в зависимости от наработки изделий в эксплуатации, экономических расчетов.

Гамма-процентный ресурс определяется из выражения

$$1 - F_R(t) = \gamma / 100,$$

где $F_R(t)$ - функция распределения вероятностей ресурса объекта.

Средний срок службы. Календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние называется сроком службы.

Математическое ожидание срока службы называется средним сроком службы.

Статистическая оценка среднего срока службы объекта определяется по формуле

$$\bar{T}_c^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{ci}, \quad (2.22)$$

где T_{ci} - срок службы i -го объекта.

Различают "гамма-процентный срок службы" и "назначенный срок службы". Гамма-процентный срок службы - это календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначенный срок службы - это суммарная календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Под установленным сроком службы понимается технико-экономически обоснованный или заданный срок службы, обеспечиваемый конструкцией, технологией изготовления и эксплуатацией, в пределах которого объект не должен достичь предельного состояния.

Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются гамма-процентный полный ресурс (срок службы), средний полный ресурс (срок службы).

Следует различать также гарантийный срок службы - отрезок календарного времени, в течение которого изготовитель обязуется безвозмездно исправлять все выявляющиеся в процессе эксплуатации изделий недостатки при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации.

Гарантийный срок службы не является показателем надежности изделий и не может служить основой для нормирования и регулирования надежности. Он устанавливает лишь взаимоотношения между потребителем и изготовителем.

2.2.3. Показатели ремонтпригодности

Наряду с распределением времени безотказной работы рассматривается также распределение времени восстановления τ_v . Восстановление работоспособного состояния объекта включает: идентификацию отказа (определение его места и характера), наладку или замену отказавшего элемента, регулирование и контроль технического состояния данной системы и контроль работоспособности объекта в целом.

Аналогично характеристикам безотказности при заданном времени восстановления τ_v для объектов с восстановлением используются характеристики: вероятность восстановления, интенсивность восстановлений, среднее время восстановления и средняя трудоемкость восстановления.

Вероятность восстановления. Под вероятностью восстановления понимают вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение, т.е.

$$P(\tau_v) = P\{\tau \leq \tau_v\} = \int_0^{\tau_v} f(\tau_v) d\tau,$$

где $f(\tau_v)$ - функция плотности распределения вероятностей времени восстановления объекта.

Интенсивность восстановлений - это условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

$$\mu(\tau_v) = f(\tau_v) / [1 - P(\tau_v)],$$

где $f(\tau_v)$ - функция плотности вероятности восстановлений.

Среднее время восстановления. Под средним временем восстановления понимается математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.

$$\bar{\tau}_s = \int_0^{\infty} [1 - P(\tau_s)] d\tau_s. \quad (2.23)$$

Для статистической оценки среднего времени восстановления пользуются формулой

$$\bar{\tau}_s^* = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{si}}{n}, \quad (2.24)$$

где τ_{si} - время восстановления объекта после i -го отказа;

n - число отказов за определенный период работы объекта.

Если под наблюдением находятся несколько агрегатов (систем) однотипного оборудования, то среднее время восстановления определяется по формуле

$$\bar{\tau}_s^* = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \tau_{sij}}{\sum_{i=1}^n n_i},$$

где τ_{sij} - время восстановления j -го объекта между $(i-1)$ -м и i -м отказами;

n_j - число отказов j -го объекта.

Среднее время восстановления является одним из наиболее наглядных количественных характеристик, позволяющих оценивать ремонтпригодность изделий, рассчитанных на длительное использование.

Как было выше отмечено, в качестве количественной характеристики процесса восстановления применяется также функция восстановления $H(t)$, определяемая как математическое ожидание числа восстановлений в течение определенного времени. Поэтому для любого ординарного потока отказов в качестве характеристики потока восстановлений может применяться и функция $h(t) = dH(t)/dt$ - плотность восстановления (2.20).

Средняя трудоемкость восстановления - это математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Для комплексной оценки ремонтпригодности допускается также дополнительно использовать показатели: удельная трудоемкость ремонта и удельная трудоемкость технического обслуживания.

2.2.4. Показатели монтажепригодности

Для общей оценки монтажепригодности принят комплекс показателей, состав которых позволяет сравнивать между собой однотипные машины по приспособленности к монтажу на объектах применения, дать полную и всестороннюю оценку конструктивного и технологического совершенства оборудования по монтажепригодности. Количественные значения основных показателей монтажепригодности должны включаться в техническое задание на проектирование, технические условия на изготовление и контролироваться на всех стадиях проектирования, производства и испытаний машин. Наряду с этим для более полной характеристики конструкций машин и оценки частных их свойств по монтажепригодности предложены дополнительные показатели.

В соответствии с руководящим документом РД 26-16-45-97 [46] для общей оценки монтажепригодности оборудования приняты показатели:

1. Суммарная и оперативная трудоемкость монтажа (чел.-ч).
2. Суммарная стоимость монтажа.
3. Коэффициент монтажепригодности.

Для оценки частных свойств оборудования рекомендуется применять следующие показатели:

- вероятность выполнения монтажных работ в заданное время;
- среднее время выполнения монтажных работ (час);
- частота монтажа;
- показатель технологичности объекта при монтаже;
- коэффициент собираемости;
- коэффициент сборности;
- коэффициент сложности машин при монтаже;
- коэффициент удобства монтажа.

Суммарная трудоемкость монтажа T_m (чел.-ч) включает трудоемкость основных, вспомогательных, пригоночно-доделочных и подготовительно-заключительных работ, производимых при монтаже объекта

$$T_m = \sum_{i=1}^n t_{m,i} = \sum_{i=1}^n t_{oi} + \sum_{i=1}^n t_{vi} + \sum_{i=1}^n t_{пр.д,i} + \sum_{i=1}^n t_{п-з,i}, \quad (2.25)$$

где $t_{m,i}$ - трудоемкость монтажа i -ой сборочной единицы объекта, чел.-ч;

t_{oi} - оперативная трудоемкость основных работ при монтаже i -ой сборочной единицы объекта, чел.-ч;

t_{vi} - оперативная трудоемкость вспомогательных работ при монтаже i -ой сборочной единицы объекта, чел.-ч;

$t_{пр.д. i}$ - оперативная трудоемкость пригоночно-доделочных работ при монтаже i -ой сборочной единицы объекта, связанных с устранением конструктивных и производственных дефектов, чел.-ч;

$t_{п-з. i}$ - трудоемкость подготовительно-заключительных работ при монтаже i -ой сборочной единицы объекта, чел.-ч;

n - общее количество монтируемых сборочных единиц объекта.

Оперативная трудоемкость монтажа $T_{мо}$ (чел.-ч) - суммарная трудоемкость основных, вспомогательных и пригоночно-доделочных работ при монтаже объекта

$$T_{мо} = \sum_{i=1}^n t_{oi} + \sum_{i=1}^n t_{vi} + \sum_{i=1}^n t_{пр.д. i} \quad (2.26)$$

Суммарная стоимость монтажа Q_m (манат) - суммарная стоимость основных, вспомогательных и пригоночно-доделочных работ при монтаже объекта

$$Q_m = \sum_{i=1}^n q_{mi} = K_1 \left[K_2 \sum_{i=1}^n t_i y_i \lambda + g_1 + g_2 \right], \quad (2.27)$$

где q_{mi} - стоимость монтажа i -ой сборочной единицы объекта, манат;

t_i - трудоемкость монтажа i -ой сборочной единицы объекта, чел.-ч;

y_i - средний разрядный коэффициент, учитывающий квалификацию рабочих при монтаже i -ой сборочной единицы объекта;

λ - тарифная ставка рабочего IV разряда, занятого при монтаже i -ой сборочной единицы объекта, манат/чел.-ч;

g_1 - стоимость материалов, применяемых при монтаже сборочных единиц объекта, манат;

g_2 - стоимость использования средств механизации при монтаже сборочных единиц комплекса, манат;

K_1 - коэффициент, учитывающий плановые накопления
($K_1 = 1,06$);

K_2 - коэффициент, учитывающий накладные расходы
($K_2 = 1,7$).

Коэффициент монтажепригодности K_m - отношение оптовой цены объекта к его суммарной стоимости, включая стоимость монтажных работ

$$K_m = \frac{\sum_{i=1}^n q_{oi}}{\sum_{i=1}^n q_{oi} + \sum_{i=1}^n q_{mi}}, \quad (2.28)$$

где q_{oi} - оптовая цена i -ой сборочной единицы объекта, манат.

Для оценки частных свойств монтажепригодности объектов приняты следующие свойства [46]:

Вероятность выполнения монтажных работ в заданное время. Под вероятностью выполнения монтажных работ в заданное время $P_m(\tau)$ понимается вероятность того, что время монтажа объекта не превысит заданное значение.

Среднее время выполнения монтажных работ $\bar{\tau}_m$ (час) определяется как математическое ожидание времени монтажа объекта.

Частота монтажа ω определяется как математическое ожидание числа циклов (монтаж, эксплуатация, демонтаж, ремонт, резерв и прочие), сделанных объектом в течение рассматриваемого календарного времени.

Показатель технологичности монтажа Π_{tex} - отношение трудовых затрат на выполнение основных монтажных работ к общим затратам на монтаж объекта, исключая трудовые затраты на пригоночно-доделочные работы.

Коэффициент собираемости K_c определяется как отношение трудовых затрат на выполнение основных монтажных работ к общим трудовым затратам на монтаж объекта, исключая трудовые затраты на выполнение вспомогательных монтажных работ.

Коэффициент сборности K_{cb} - отношение трудовых затрат на сборку объекта на предприятии - изготовителе к общим трудовым затратам на сборку и монтаж.

Коэффициент сложности машин при монтаже $K_{см}$ - отношение суммарной трудоемкости установочных, сборочных и регулировочных работ к трудоемкости установочных работ при монтаже объекта.

Коэффициент удобства монтажа $K_{удм}$ определяется как отношение числа удобных рабочих поз исполнителя при выполнении монтажа объекта к общему числу характерных поз. Его можно определять также исходя из трудоемкости операций, выполненных в неудобных позах.

Кроме перечисленных количественных показателей, рекомендуется при оценке монтажепригодности объекта фиксировать нетехнологичные конструктивные решения, касающиеся в основном взаимоувязки отдельных сборочных единиц и агрегатов.

Предложенный комплекс количественных показателей монтажепригодности позволяет как на стадии проектирования, так и в условиях эксплуатации серийных образцов техники, применять единый методический подход к решению задачи повышения монтажепригодности в рамках общей проблемы обеспечения необходимого уровня надежности оборудования.

2.2.5. Показатели сохраняемости

Различают «средний срок сохраняемости» и «гамма - процентный срок сохраняемости». Средний срок сохраняемости - это математическое ожидание срока сохраняемости. Гамма-процентный срок сохраняемости - это срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

2.2.6. Комплексные показатели надежности

Комплексные показатели чаще всего используются для оценки надежности объектов с случайными периодами выполнения технического обслуживания (ТО) и ремонтов (Р).

Коэффициент готовности. Под коэффициентом готовности K_r понимают вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

При порядке обслуживания, предусматривающем немедленное начало восстановления отказавшего объекта, статистическая оценка коэффициента готовности есть отношение суммарного времени безотказной работы объекта за некоторый период эксплуатации к сумме времени безотказной работы и времени, затраченного на отыскание и устранение отказов за тот же период эксплуатации (без учета простоев на проведение плановых ремонтов).

Для стационарного периода эксплуатации статистическое среднее значение коэффициента готовности $\bar{K}_r$ за определенный интервал работы объекта определяется:

$$\bar{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^m \tau_{vj}}, \quad (2.29)$$

где t_{pi} - продолжительность i -го интервала пребывания объекта в работоспособном состоянии;

τ_{vj} - продолжительность j -го простоя объекта на ремонте;

n - число интервалов пребывания объекта в работоспособном состоянии;

m - число простоев объекта на ремонте.

Выражение (2.29) можно представить через среднюю наработку на отказ $\bar{T}$ и среднюю оперативную продолжительность восстановления после отказов $\bar{\tau}_b$ объекта

$$K_r = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{\tau}_b}. \quad (2.30)$$

Для нестационарного периода эксплуатации, для случая экспоненциального закона распределения времени безотказной работы и времени восстановления, имеется зависимость:

$$K_r = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{\tau}_b} + \frac{\bar{\tau}_b}{\bar{T} + \bar{\tau}_b} \exp\left(1 + \frac{\bar{\tau}_b}{\bar{T}}\right) \ln P_d, \quad (2.31)$$

где P_d - доверительный уровень вероятности безотказной работы, значения которого рекомендуется принимать в пределах $0,80 \div 0,95$.

Наряду со стационарным монтажом машин и агрегатов характерным для многих видов нефтепромыслового оборудования является периодическое пребывание его на отдельных точках

эксплуатации. Поэтому при оценке надежности объектов, подвергающихся в процессе эксплуатации полному или частичному демонтажу с последующим монтажом на новой точке, необходимо учитывать и затраты времени на ремонты оборудования, производимые в указанный период. В этом случае для стационарного периода эксплуатации [30]:

$$\bar{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^m \tau_{sj} + \sum_{d=1}^l \tau_{smd}}, \quad (2.32)$$

где τ_{smd} - продолжительность d -го простоя объекта на ремонте в процессе монтажа;

l - число простоев объекта на ремонте в процессе монтажа.

В данном случае $m+l > n$, так как часть работ по ремонту оборудования производится для устранения неисправностей и в процессе монтажа на новой точке эксплуатации, т.е. до начала отсчета наработки объекта.

Коэффициент оперативной готовности. Под коэффициентом оперативной готовности понимают вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объектов, необходимость применения которых возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени. До этого момента такие объекты могут находиться как в состоянии нагруженного или облегченного резерва, так и в режиме применения - для выполнения других рабочих функций. В обоих режимах возможно возникновение отказов и восстановление работоспособности объекта.

Если вероятность безотказной работы объекта $P(t_p)$ в течение времени t_p не зависит от момента начала работы t , то коэффициент оперативной готовности может быть вычислен по формуле:

$$K_{op} = K_r \cdot P(t_p). \quad (2.33)$$

Коэффициент технического использования. Отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период эксплуатации, называется коэффициентом технического использования.

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ учитывает затраты времени на плановые и неплановые ремонты и характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

Аналогично выражениям (2.29) и (2.30) имеем:

$$\bar{K}_{\text{ти}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{e=1}^r \tau_{\text{те}} + \sum_{j=1}^m \tau_{\text{вж}}}; \quad (2.34)$$

$$\bar{K}_{\text{ти}} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{\tau}_{\text{то}} + \bar{\tau}_{\text{в}}}, \quad (2.35)$$

где $\tau_{\text{те}}$ - продолжительность e -го простоя объекта на техническом обслуживании;

r - число простоев объекта на техническом обслуживании.

Для случая периодического демонтажа - монтажа оборудования $K_{\text{ти}}$ определяется:

$$\bar{K}_{\text{ти}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{e=1}^r \tau_{\text{те}} + \sum_{g=1}^k \tau_{\text{т.мг}} + \sum_{j=1}^m \tau_{\text{вж}} + \sum_{d=1}^l \tau_{\text{в.мд}}}; \quad (2.36)$$

где $\tau_{\text{т.мг}}$ - продолжительность g -го простоя объекта на техническом обслуживании в процессе монтажа;

$\tau_{\text{в.мд}}$ - продолжительность d -го простоя объекта на ремонте в процессе монтажа.

Таким образом, расчет комплексных показателей надежности для оборудования с периодическим демонтажом должен производиться с учетом параметров системы ТО и Р, принятых в периоды повторного монтажа.

2.3. Дополнительные количественные показатели надежности

Для оценки надежности оборудования, функционирующего в специфических условиях бурения скважин и добычи нефти и газа, возникает необходимость введения дополнительных показателей, отражающих эту специфику [43].

2.3.1. Показатели безотказности устройств, находящихся в режиме ожидания

К устройствам, находящимся длительное время в режиме ожидания, прежде всего относятся элементы средств автоматизации и запорные устройства манифольдов и систем сбора, подготовки и транспортировки продукции (СПТП). Данное оборудование относится к типу устройств, работающих только в определенных ситуациях (нефтегазопрооявления), все остальное время они находятся в режиме ожидания («дежурном» режиме).

В качестве запорных устройств, применяются прямоточные задвижки с гидроприводом и ручным управлением. В функцию задвижек в зависимости от выполняемой технологической операции входит открытие свободного движения жидкости или газа или перекрытие потоков жидкости или газа.

Как было выше отмечено, при расчетах надежности подобных устройств, следует различать понятия отказа и отказа в срабатывании. Под отказом устройства понимается событие, при котором устройство частично или полностью утрачивает способность выполнять предусмотренные технологические операции. Под отказом в срабатывании понимается событие, состоящее в невозможности выполнения устройством какой-либо технологической операции при возникновении необходимости в ее выполнении.

Отказы в срабатывании оборудования можно подразделить на два вида:

- а) обусловленные отказом какого-либо элемента устройства, возникшим в режиме «ожидания» нефтегазопрооявления («дежурном» режиме);
- б) обусловленные отказом какого-либо элемента, возникшим непосредственно при нефтегазопрооявлении или связанным с ним каким-либо побочным явлением.

За отказ запорного устройства в зависимости от выполняемой им функции принимается: при работе задвижки на закрытие - нару-

шение ее герметичности, при работе задвижки на открытие - невозможность перепуска жидкости или газа.

Учитывая, что отказы функционирования рабочих элементов систем являются сравнительно редкими и даже один случай отказа в срабатывании запорного устройства может привести к весьма значительному загрязнению окружающего пространства, готовность срабатывания оценивается как вероятность отсутствия отказа в срабатывании запорного устройства при возникновении необходимости в таком срабатывании.

На стадии нормальной работы устройства, т.е. при отсутствии признаков износа и старения, интенсивность отказов запорных устройств в режиме ожидания $\lambda_{\text{ж}}$ принимается независимым от интервала времени, т.е. потоки событий рассматриваются как стационарные пуассоновские (простейшие).

В связи с изложенным выше, такой показатель надежности как коэффициент готовности не может характеризовать надежность задвижек (он всегда близок к единице). Поэтому для этой цели используются такие показатели, как готовность срабатывания и среднее число срабатываний.

Готовность срабатывания устройства $R_n(x)$ есть вероятность отсутствия отказов в срабатывании при последовательности n случаев нефтегазопроявлений.

Учитывая то обстоятельство, что нефтегазопроявления скважин сравнительно редки, и даже один случай отказа в срабатывании оборудования может привести к отрицательным последствиям вплоть до потери скважины, готовность срабатывания оценивается как вероятность отсутствия отказа в срабатывании при первом же случае нефтегазопроявления $R_1(x)$. Принимая вероятность $R_1(x)$ неизменной (не зависящей от порядкового номера случая нефтегазопроявления скважины), получаем

$$R_n(x) = [R_1(x)]^n. \quad (2.37)$$

Введем обозначения: $h_{\text{нг}}$ - интенсивность потока событий нефтегазопроявления скважины; λ_d - интенсивность возникновения событий отказа в срабатывании в «дежурном» режиме; $P_{\text{нг}}$ - вероятность отсутствия отказа в срабатывании при данном нефтегазопроявлении.

На стадии нормальной работы устройства, т.е. при отсутствии признаков износа, параметр λ_d принимается независимым от

интервала времени, т. е. потоки событий рассматриваются как стационарные пуассоновские (простейшие). Вероятность $P_{\text{нг}}$ принимается независимой от количества случаев нефтегазопроявления.

Готовность срабатывания $R_1(x)$ определяется из выражения

$$R_1(x) = \int_0^{\infty} P_{\text{нг}}(t) P_1(t) dt, \quad (2.38)$$

где $P_{\text{нг}}(t)$ - вероятность того, что в интервале $(0, t)$ отсутствуют нефтегазопроявления, а в интервале $(t, t + \Delta t)$ возникло нефтегазопроявление.

Учитывая, что случаи нефтегазопроявления представляют собой простейший поток, и вероятность попадания нефтегазопроявления в элементарный интервал равна $h_{\text{нг}} \Delta t$ получаем

$$P_{\text{нг}}(t) = e^{-h_{\text{нг}} t} h_{\text{нг}} \Delta t, \quad (2.39)$$

где $P_1(t)$ - вероятность безотказного срабатывания задвижки при нефтегазопроявлениях скважины,

$$P_1(t) = e^{-\lambda_d t} P_{\text{нг}}. \quad (2.40)$$

Подставляя полученные данные в (2.38), будем иметь

$$R_1(x) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_d t} e^{-h_{\text{нг}} t} P_{\text{нг}} h_{\text{нг}} dt = \frac{P_{\text{нг}} h_{\text{нг}}}{h_{\text{нг}} + \lambda_d} = \frac{P_{\text{нг}}}{1 + \frac{\lambda_d}{h_{\text{нг}}}}. \quad (2.41)$$

Среднее число срабатываний запорных устройств $N_{\text{ср}}$ есть математическое ожидание порядкового номера того нефтегазопроявления, при котором наступает отказ в срабатывании, если при всех предыдущих проявлениях скважины устройство срабатывало. Этот показатель носит несколько условный характер в связи с тем, что количество имеющих место на практике случаев нефтегазопроявлений скважины значительно ниже ресурса на срабатывание запорного устройства. Но сам по себе этот показатель хорошо характеризует уровень надежности технического устройства дискретного действия, каковым является задвижка.

Среднее число срабатываний $N_{\text{ср}}$ определяется как отношение некоторого числа нефтегазопроявлений n к математическому ожиданию числа отказов оборудования при n нефтегазопроявлениях. Оно, согласно формуле Бернулли, составляет $[1 - R_1(x)]n$.

Тогда

$$N_{cp} = \frac{n}{[1 - R_1(x)]n} = \frac{1}{1 - \frac{P_{нг} h_{нг}}{h_{нг} + \lambda_d}}. \quad (2.42)$$

Для расчета надежности, например манифольдов, последние представляются эквивалентными расчетными схемами.

Интенсивность отказов запорных устройств резервных линий в режиме ожидания λ_d невелика, так как запорные устройства этих линий не испытывают воздействие неблагоприятных факторов.

Поэтому в большинстве случаев справедливо соотношение $\lambda_d / h_{нг} \ll 1$ и $R_1(x) \approx P_{нг}$.

Коэффициент защищенности окружающей среды $R(t)$ характеризует степень зависимости загрязнения окружающей среды от надежности элементов системы. В свою очередь, количество вытекающей в море нефти ΔQ_n и количество выбрасываемого в атмосферу газа ΔQ_g за прогнозируемый промежуток времени t зависит от дебита скважины и параметров емкостей и нефтегазопроводов; поэтому носит случайный характер.

Коэффициент защищенности окружающей среды $R(t)$ является функцией отношения математического ожидания случайной величины ΔQ за время t к суммарному объёму продукции Q_i , передаваемой исследуемой системой в течение времени t

$$R(t) = 1 - \frac{M[\Delta Q]_t}{Q_i}, \quad (2.43)$$

$$M[\Delta Q]_t = \sum_{i=1}^c \Delta q_i \cdot n_i; \quad (2.44)$$

где Δq_i - количество продукции, теряемой при одном отказе, приводящем к нарушению герметичности i -ой установки системы;

n_i - количество отказов i -ой установки за время t ;

c - общее число установок в системе.

Величина Δq_i зависит от вида повреждения i -ой установки и времени t_{λ_i} , необходимого дежурному персоналу для осуществления перекрытия потока продукции; вычисляется из выражения

$$\Delta q_i = z_i \cdot q_i \cdot t_{\lambda_i}, \quad (2.45)$$

где z_i - отношение количества продукции, выбрасываемой в окружающую среду при нарушении герметичности i -ой технологической установки, к объему передаваемой системой продукции;

q_i - пропускная способность технологической системы.

Подставляя (2.44) и (2.45) в (2.43), получим

$$R(t) = 1 - \frac{q_i \sum_{i=1}^c z_i t_{\lambda_i} n_i}{q_i t} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^c z_i t_{\lambda_i} n_i}{t}. \quad (2.46)$$

Таким образом, коэффициент защищённости окружающей среды представляет собой отношение количества продукции, передаваемого потребителю на выходе системы, к получаемому системой на входе. Предложенный обобщённый показатель надёжности СПТП $R(t)$ характеризует относительное количество выбрасываемой в окружающую среду продукции и обладает тем преимуществом, что он не зависит от дебита скважины и дает возможность сравнивать по надёжности платформы различной производительности.

2.3.2. Показатели надёжности для оценки опасных отказов

Оценка надёжности оборудования с точки зрения безопасности его эксплуатации производится с помощью следующих показателей, регламентированных руководящим документом стандартизации РДС 014717-001-83 [47].

Вероятность отсутствия опасного отказа $P_0(t)$ - это вероятность того, что в пределах заданной наработки для восстанавливаемого и невосстанавливаемого изделий, опасный для здоровья человека отказ не произойдет.

Вероятность отсутствия опасного отказа (или вероятность безопасной работы) характеризует безотказную эксплуатацию изделия и статистически определяется отношением числа объектов, проработавших до момента времени t без опасных отказов, к числу объектов, работоспособных в начальный момент времени $t=0$.

Средняя наработка до опасного отказа $\bar{T}_{он}$ (для невосстанавливаемого изделия) и *средняя наработка между опасными отказами $\bar{T}_{ов}$* (для восстанавливаемого изделия), представляющие

собой математическое ожидание наработок изделий до первых опасных отказов или соответственно между опасными отказами.

Статистически эти показатели определяются отношением суммы наработок изделий соответственно до опасного отказа и между опасными отказами к общему количеству изделий, находящихся под наблюдением, и к суммарному числу отказов этих изделий.

Интенсивность опасных отказов $\lambda_{он}$ (для невосстанавливаемого изделия) и параметр потока опасных отказов $\omega_{ов}$ (для восстанавливаемого изделия), представляющие собой плотность вероятности возникновения опасного отказа объекта.

Статистически оценка интенсивности опасных отказов определяется отношением числа опасных отказов изделий в единицу времени к среднему числу изделий, проработавших в рассматриваемый промежуток времени без опасных отказов при условии, что отказавшие изделия не восстанавливаются и не заменяются исправными, т.е. число находящихся под наблюдением изделий с течением времени уменьшается.

Параметр потока опасных отказов $\omega_{ов}$ определяется отношением числа опасных отказов однотипных изделий в единицу времени к числу находящихся под наблюдением изделий при условии, что все отказавшие одноименные детали восстанавливаются.

В данном случае готовность срабатывания $P_r(x)$ - вероятность отсутствия отказа защитного устройства в срабатывании в режиме ожидания при возникновении необходимости в срабатывании защитного устройства.

Готовность срабатывания характеризует надежность объектов, предназначенных для выполнения определенной кратковременной задачи, например, защитных устройств.

Коэффициент оперативной готовности $K'_{ор}$ - вероятность того, что изделие, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать без опасных отказов в течение заданного интервала времени. Коэффициент оперативной готовности рассчитывается по формуле

$$K'_{ор} = K_r P_0(t),$$

где K_r - коэффициент готовности изделия;

$P_0(t)$ - вероятность отсутствия опасных отказов за время t .

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность изделий, предназначенных для выполнения определенной задачи длительного функционирования в прерывистом режиме.

Коэффициент технической готовности K_{π} - вероятность того, что изделие, находясь в состоянии ожидания в непрерывном режиме, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени; вычисляется по формуле

$$K_{\pi} = K_{\text{ти}} P_0(t), \quad (2.47)$$

где $K_{\text{ти}}$ - коэффициент технического использования изделия.

Коэффициент технической готовности характеризует надежность изделий, предназначенных для выполнения определенной задачи длительного функционирования в непрерывном режиме.

Изделия, предназначенные для выполнения определенной задачи (главным образом запорные устройства, устройства автоматики, ограничитель подъема талевого блока и др.), имеют такой же временной режим использования, что и защищаемое ими оборудование. При отказе этого оборудования одновременно выходят из действия и соответствующие защитные устройства.

Большинство же видов нефтепромыслового оборудования в целом можно рассматривать как технические системы, состоящие из определенного количества подсистем (узлов), каждая из которых включает в себя один или несколько элементов и защитное устройство, выполняющее функцию защиты этих элементов или препятствующее возникновению опасной ситуации в случае их отказа.

Вероятность безопасной работы подобной подсистемы за время t определяется по формуле [10]

$$P_{mo}(t) = P_0(t) + \sum_{m=1}^{\infty} \{q_m(t) [P(\eta = 1)]^m\}, \quad (2.48)$$

где $q_m(t)$ - вероятность того, что за время t произойдет m опасных отказов элементов;

$P(\eta = 1)$ - вероятность того, что после опасного отказа элемента происходит успешное срабатывание защитного устройства.

При пуассоновском потоке отказов элементов вероятность $P_{mo}(t)$ вычисляется по формуле

$$P_{mo}(t) = [P_0(t)]^{[1-P(\eta=1)]}. \quad (2.49)$$

Соответственно наработка на опасный отказ определяется по формуле

$$T_{mo} = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \{ [P(\eta = 1)]^m \int_0^{\infty} q_m(t) dt \}, \quad (2.50)$$

где T_0 - наработка изделия до первого опасного отказа.

При пуассоновском потоке отказов элементов наработка изделия между опасными отказами рассчитывается по формуле

$$T_{mo} = \frac{T_0}{1 - P(\eta = 1)}. \quad (2.51)$$

Вероятность $P_i(\eta = 1)$ характеризует надежность функционирования системы автоматических устройств, осуществляющих защиту обслуживающего персонала при опасных отказах оборудования. $P_i(\eta = 1)$ вычисляется в зависимости от количества защитных устройств, установленных в i -ом изделии. Если при опасном отказе элемента i -го изделия требуется срабатывание l_i автоматических защитных устройств, то надежность такой системы вычисляется по формуле

$$P_i(\eta = 1) = [P_i(x)]^{l_i} \quad (2.52)$$

Вопросы, связанные с оценкой надежности функционирования защитных устройств, с определением межремонтного периода оборудования с учетом опасных отказов и ряд других свойств системы человек-технический объект, рассматриваются в работах [10, 47].

3. Вероятностные законы распределения

Характеристики или параметры производственных процессов и изделий, в том числе время (период) работы оборудования до отказа и между отказами, а также время восстановления, являются непрерывными или дискретными случайными величинами. Известно, что непрерывные случайные величины могут с той или иной вероятностью располагаться в определенных областях возможных значений. Закон, связывающий возможные значения случайной величины с соответствующими этим значениям вероятностями, называется законом распределения случайных величин.

Показатели надежности нефтепромыслового оборудования представляют собой в основном величины, определяемые различными методами из функций распределения вероятностей тех или иных случайных величин, характеризующих надежность (время безотказной работы, время восстановления работоспособного состояния, количество отказов и т.п.). Поэтому задачей математической обработки статистических данных об отказах изделий для оценки показателей надежности, фактически является получение функций и законов распределения случайных величин.

При анализе и оценке надежности объекта (числа отказов, времени безотказной работы, времени восстановления и др.) используют различные дискретные и непрерывные распределения.

Опыт показывает, что для механических систем из дискретных распределений наибольшее практическое применение имеют: закон распределения Пуассона и биномиальное распределение; из непрерывных законов распределения случайных величин: усеченный нормальный, Вейбулла, экспоненциальный; несколько реже - логарифмически нормальный, закон Релея и гамма - распределение.

3.1. Дискретные распределения

Закон распределения Пуассона. Как отмечалось выше (раздел 2), поток событий называется пуассоновским, если он удовлетворяет требованиям стационарности, ординарности и отсутствия последействия. Наряду с этим, случайные величины в процессе испытаний (или наблюдений) являются целыми неотрицательными числами $0, 1, 2, \dots, m$, причем последовательность этих чисел теоретически неограничена.

Распределение Пуассона определяется выражением

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (3.1)$$

где P_m - вероятность появления числа событий (отказов) m в заданном интервале времени t ;

a - среднее число событий (отказов), приходящееся на интервал времени t (математическое ожидание событий в интервале времени t).

Формулу (3.1) можно представить в виде:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} \left(\frac{t}{\bar{T}} \right)^m \cdot e^{-\frac{t}{\bar{T}}}, \quad (3.2)$$

где t - время, для которого определяется вероятность появления m отказов в системе;

$\bar{T}$ - среднее время безотказной работы системы.

В соответствии с теоремой сложения вероятностей выражение $\sum_{m=0}^{\infty} P_m = 1$ рассматривается как сумма вероятностей полной группы несовместных событий. Тогда, задаваясь значениями $m = 0, 1, 2$ и т. д., уравнение (3.2) можно представить в виде бесконечного ряда, сумма которого равна единице, т.е.

$$P_m = e^{-\frac{t}{\bar{T}}} + \frac{t}{\bar{T}} e^{-\frac{t}{\bar{T}}} + \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\bar{T}} \right)^2 e^{-\frac{t}{\bar{T}}} + \frac{1}{6} \left(\frac{t}{\bar{T}} \right)^3 e^{-\frac{t}{\bar{T}}} + \dots = 1.$$

Каждый из членов ряда определяет вероятность соответствующего числа отказов. Так, первый член его $e^{-\frac{t}{\bar{T}}}$ представляет собой вероятность отсутствия повреждений за время t , т.е. вероятность безотказной работы, выраженную экспоненциальным законом

$P(t) = e^{-\frac{t}{\bar{T}}} = e^{-\lambda t}$. Следовательно, экспоненциальный закон надежности можно получить, как частный случай распределения Пуассона

при $m = 0$. Второй член ряда $\frac{1}{\bar{T}} e^{-\frac{t}{\bar{T}}}$ определяет вероятность того, что за относительное время $\frac{t}{\bar{T}}$ произойдет один отказ и т.д.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины для закона Пуассона, равны его параметру

$$M(x) = a; \quad D(x) = a.$$

Это свойство распределения Пуассона часто применяется на практике для решения вопроса: правдоподобна ли гипотеза о том, что случайная величина x распределена по закону Пуассона.

Биномиальное распределение. Одним из наиболее важных дискретных распределений является двухпараметрическое биномиальное распределение. Согласно определению дискретная случайная величина X имеет биномиальный закон распределения с параметрами n и p , если X принимает значения $0, 1, 2, \dots, m, \dots, n$ с вероятностями

$$P(X = m) = c_n^m q^m p^{n-m} = P_m, \quad (3.3)$$

где p - любое вещественное число от 0 до 1; $p = 1 - q$;

$$q = 1 - p;$$

$$c_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Естественно, соответственно появления k случаев безотказности вычисляют из соотношения

$$P_k = c_n^k p^k q^{n-k}.$$

Следовательно, если проводится n независимых испытаний с вероятностью q отказа и вероятностью p безотказности в каждом из них, то вероятность появления m отказов подчиняется биномиальному распределению.

Важно также отметить, что параметр n должен быть либо фиксированным в начале испытаний, либо независимым от результатов каждого испытания.

Математическое ожидание числа отказов равно

$$M[m] = np,$$

а число случаев безотказности соответственно

$$M[k] = np.$$

Дисперсия числа отказов (случаев безотказности) одинакова и равна

$$D[m] = D[k] = npq.$$

Закон биномиального распределения нашел широкое применение в технике при оценке надежности объектов, работающих в циклическом режиме.

3.2. Непрерывные распределения

Усеченное нормальное распределение. Случайная величина, которая может принимать любые положительные значения, имеет усеченное нормальное распределение, если ее плотность распределения

$$f(t) = \frac{C}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - a_0)^2}{2\sigma_0^2} \right], \quad (3.4)$$

где a_0 и σ_0 - параметры усеченного нормального распределения;

t - текущее значение времени;

C - нормирующий множитель;

$$C = \frac{1}{F_0 \left(\frac{a_0}{\sigma_0} \right)}.$$

Функции вероятности безотказной работы $P(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ для усеченного нормального распределения соответственно имеют вид

$$P(t) = \frac{F_0 \left(\frac{a_0 - t}{\sigma_0} \right)}{F_0 \left(\frac{a_0}{\sigma_0} \right)}; \quad (3.5)$$

$$\lambda(t) = \frac{f_0 \left(\frac{t - a_0}{\sigma_0} \right)}{\sigma_0 \cdot F_0 \left(\frac{a_0 - t}{\sigma_0} \right)}, \quad (3.6)$$

где $F_0 \left(\frac{a_0 - x}{\sigma_0} \right)$ - функция нормального распределения вероятностей центрированной и нормированной случайной величины, значения которой табулированы;

$F_0 \left(\frac{a_0}{\sigma_0} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a/\sigma} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx$ - интегральная функция нормального распределения, значения которой также табулированы.

Логарифмически нормальное распределение. Время безотказной работы (или время восстановления) подчиняется логарифмически нормальному закону, если распределение логарифма времени безотказной работы соответствует нормальному закону.

Плотность логарифмически нормального распределения определяется выражением

$$f(t) = \frac{m}{\sigma \cdot t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lg t - \lg a)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (3.7)$$

где σ и a параметры распределения;

$$m = \lg e \approx 0,4343.$$

В логарифмически нормальном распределении параметр a , входящий в функцию плотности вероятности, не является математическим ожиданием времени безотказной работы.

Математическое ожидание времени безотказной работы при этом распределении определяется выражением

$$M[X] = \exp \left(\frac{a}{m} + \frac{\sigma^2}{2m^2} \right).$$

Таким образом, надежность деталей при логарифмически нормальном распределении в значительной мере зависит от продолжительности работы изделия с момента начала работы, и поток отказов деталей с такими характеристиками является потоком с последствиями.

Наличие последствия означает, что вероятность наступления n отказов в промежутке $(t, t + \Delta t)$ не зависит от того сколько их было зафиксировано до времени t и как они распределялись до этого промежутка. Это условие для систем с большим числом элементов означает, что отказ любого элемента системы приводит к изменению надежности остальных элементов. т.е. имеются корреляционные связи между временем возникновения отказов отдельных элементов.

Распределение Вейбулла. Это распределение является асимметричным. Случайная величина, принимающая положительные значения, называется распределенной по закону Вейбулла, если ее функция плотности распределения имеет вид

$$f(t) = amt^{m-1} \cdot \exp(-at^m), \quad (3.8)$$

где a - параметр, определяющий масштаб;

m - параметр, определяющий асимметрию и эксцесс распределения.

Функции вероятности безотказной работы $P(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ в случае распределения Вейбулла имеют вид:

$$P(t) = \exp(-at^m); \quad (3.9)$$

$$\lambda(t) = a \cdot m \cdot t^{m-1}. \quad (3.10)$$

При $m = 3,5$ распределение Вейбулла можно считать приближенно нормальным, а при $m = 1$ распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное.

Экспоненциальное распределение. Это распределение является частным случаем распределения Вейбулла при $m = 1$. Функция плотности экспоненциального распределения соответственно имеет вид

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t), \quad (3.11)$$

где $\lambda > 0$ - параметр экспоненциального распределения.

Функции вероятности безотказной работы $P(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ при экспоненциальном законе распределения можно получить из выражений (3.9) и (3.10) путем подстановки $m = 1$.

$$P(t) = \exp(-\lambda t); \quad (3.12)$$

$$\lambda(t) = \lambda. \quad (3.13)$$

Закон Релея также является частным случаем закона распределения Вейбулла при коэффициенте формы m , равном двум.

Гамма-распределение. При этом распределении плотность вероятностей имеет вид

$$f(t) = \lambda_0 \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\lambda_0 t), \quad (3.14)$$

где λ_0 и k - параметры распределения.

Для гамма-распределения основные количественные характеристики надежности при целом и положительном k определяются выражениями

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (3.15)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}. \quad (3.16)$$

При $k = 1$ гамма-распределение превращается в экспоненциальное распределение, при $k > 1$ интенсивность отказов возрастает, при $k < 1$ - убывает.

Количественные характеристики безотказности $P(t)$ и $\lambda(t)$, а также плотности распределения $f(t)$ по наиболее характерным для нефтепромыслового оборудования законам распределения приведены на рис.3.1.

Графики плотности вероятностей распределения $f(t)$ и количественных показателей надежности $P(t)$ и $\lambda(t)$ при законах распределения: нормальном (а), Вейбулла (б), экспоненциальном (в)

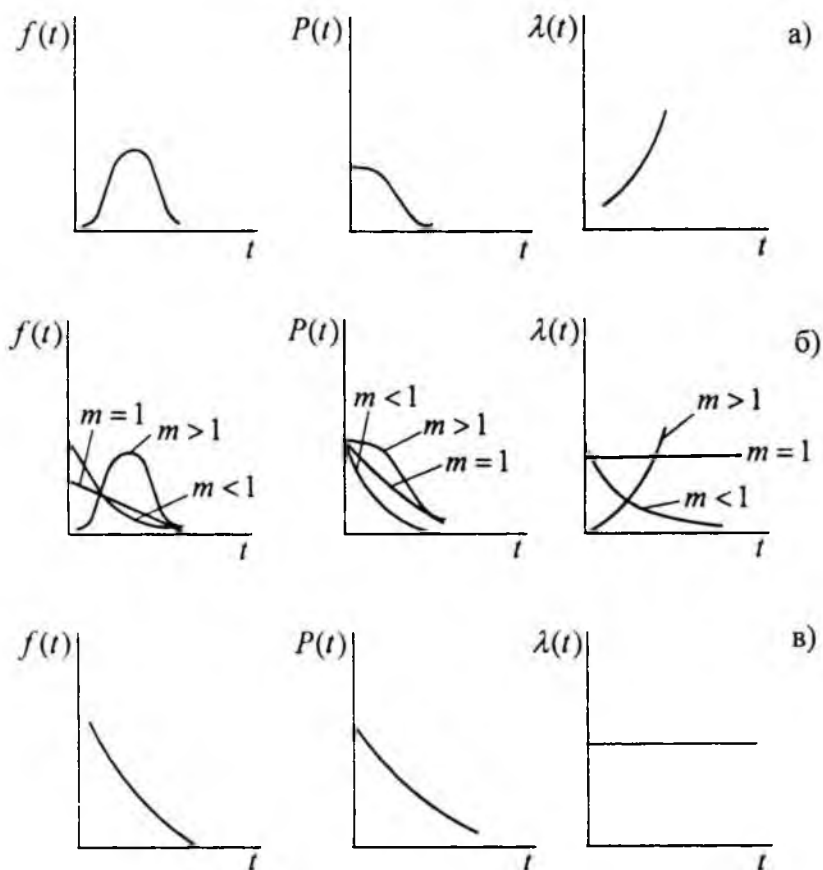


Рис. 3.1.

По перечисленным законам распределения вероятностей случайных величин важно отметить следующее.

Усеченному нормальному распределению подчиняется время безотказной работы при постепенных отказах изделий и их деталей, т.е. когда отказы происходят в основном в результате износа, усталости, разрегулировок и т.д.

Близость функции плотности распределения времени безотказной работы к логарифмически нормальному распределению соответствуют характеристикам постепенных отказов высоконадежных изделий, когда предельное состояние деталей наступает по причинам изнашивания и усталости.

Распределение Вейбулла широко применяется при оценке надежности механических систем. При параметре распределения $m \leq 1$ оно дает достаточно хорошее приближение при оценке надежности объектов в период приработки и в других случаях, когда преобладают внезапные отказы. При $m > 1$ распределение Вейбулла характеризуется возрастающей интенсивностью отказов и его удобно использовать при оценке надежности объектов, у которых преобладают постепенные отказы.

Экспоненциальному закону и распределению Релея в основном подчиняется время безотказной работы при внезапных отказах изделий и их сборочных единиц.

Гамма-распределение при параметре $k < 1$ является характеристикой времени возникновения отказов в период приработки сложных механических систем, содержащих гидравлические, пневматические или электрические подсистемы.

Рассмотренные выше законы распределения времени безотказной работы могут в большинстве случаев характеризовать надежность сложной системы лишь в определенные периоды времени ее работы. Так, в период приработки распределение времени безотказной работы может подчиняться гамма-распределению или экспоненциальному закону, а в период нормальной работы - закону Вейбулла, нормальному или логарифмически нормальному закону. В связи с этим оценку надежности сложной системы за длительный период ее эксплуатации во многих случаях целесообразно производить с использованием композиции и суперпозиции законов распределения времени между отказами.

Композиции распределений. Если закон распределения относится к функции двух случайных аргументов и к тому же эти случайные величины независимы, то общий закон распределения фак-

тически является композицией двух или более законов распределения.

Задача определения закона распределения функции нескольких случайных аргументов сложнее аналогичной задачи для функции одного аргумента.

Если известны плотности распределения $f(x)$ и $f(y)$, то плотность композиции распределений $f(z)$ для случая, когда x и y неотрицательны, можно найти следующим образом

$$f(z) = \int_0^{\infty} f(z-x) \cdot f(x) dx = \int_0^{\infty} f(z-y) \cdot f(y) dy. \quad (3.17)$$

Композиции законов распределений имеют ряд общих и частных свойств. Общие свойства композиций не зависят от вида рассматриваемых законов распределения, а частные - применимы только к определенным законам распределения.

Общие свойства композиции распределений:

1. Математическое ожидание композиции распределения равно сумме математических ожиданий независимых случайных величин, образующих рассматриваемую сложную случайную величину.

2. Дисперсия композиции распределения равна сумме дисперсий независимых случайных величин, составляющих данную сложную величину. При значительной разнице дисперсий составляющих независимых случайных величин дисперсия композиции будет близка к дисперсии той случайной величины, у которой дисперсия имеет наибольшие значения.

Частные свойства композиции законов распределений:

1. Композиция случайных величин с нормальным распределением дает также нормальное распределение.

2. Композиция экспоненциальных распределений дает новое распределение (чаще всего гамма-распределение).

3. Композиция распределений Вейбулла дает новое распределение.

4. Композиция распределений Пуассона дает также распределение Пуассона (при любом числе распределений).

5. При большом числе распределений (с одинаковыми или различными законами распределений) при условии, что дисперсии составляющих распределений не сильно отличаются друг от друга, распределение их композиции оказывается близким к нормальному.

В опубликованной литературе имеется достаточно сведений о композиции различных законов распределений, что позволяет

решать практические задачи для композиции известных законов распределения [33].

Суперпозиции распределений. Важным является решение также обратной задачи - определение параметров генеральной совокупности, подчиняющейся более сложным законам, чем известные классические распределения.

Большой практический интерес представляет случай, когда наблюдаемые величины x являются одномерными случайными величинами, взятыми из генеральной совокупности, плотность распределения которой выражается формулой:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^k C_i f_i(x), \quad (3.18)$$

где $f(x)$ - известные функции плотности распределений;

$$C_i - \text{доля } i\text{-й плотности в смеси; } \sum_{i=1}^k C_i = 1.$$

Этот случай может встречаться при обработке информации о работе сложных систем, состоящих из элементов с различным характером проявления отказов (внезапные, постепенные, из-за нарушения условий эксплуатации, обусловленные некачественным изготовлением и т.п.).

Плотность распределения смеси вида (3.18) называется суперпозицией законов распределения.

Одна из трудностей использования таких статистических моделей состоит в том, что при неизвестных физических процессах, происходящих в изделиях, не имеется каких-либо приемлемых методов для определения видов компонентов суперпозиции.

Плотность распределения вероятности суперпозиции двух экспоненциальных законов представляется в виде

$$f(x) = C_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} + C_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 x}, \quad (3.19)$$

где λ_1 и λ_2 - параметры соответствующих экспоненциальных законов распределений;

C_1 и C_2 - доля участия смешанных законов распределения, определяемые из условия $C_1 + C_2 = 1$.

В случае, когда не известен аналитический вид суперпозиционной функции оценки параметров λ_1 , λ_2 , C_1 , C_2 определяемые методом моментов, находятся путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N t_i / N &= C_1 \frac{1}{\lambda_1} + (1 - C_1) \frac{1}{\lambda_2}; \\
\sum_{i=1}^N t_i^2 / N &= 2C_1 \left(\frac{1}{\lambda_1} \right)^2 + 2(1 - C_1) \left(\frac{1}{\lambda_2} \right)^2; \\
\sum_{i=1}^N t_i^3 / N &= 6C_1 \left(\frac{1}{\lambda_1} \right)^3 + 6(1 - C_1) \left(\frac{1}{\lambda_2} \right)^3,
\end{aligned} \tag{3.20}$$

где N - объем партии изделий, находящихся под наблюдением;
 t - время работы изделий.

Для рассматриваемого случая основные количественные характеристики надежности имеют вид

$$P(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}; \tag{3.21}$$

$$\lambda(t) = \frac{C_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}}. \tag{3.22}$$

Если $\lambda_1 < \lambda_2$, то интенсивность отказов по времени уменьшается от величины $\lambda(t) = C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2$ при $t = 0$ до λ_1 при $t \rightarrow \infty$.

Суперпозиция двух экспоненциальных законов может характеризовать безотказность сложной системы с учетом периода приработки. Это также относится к суперпозиции экспоненциального закона с гамма-распределением или распределением Вейбулла при $m < 1$.

Влияние внезапных и постепенных отказов может быть учтено при суперпозиции экспоненциального и усеченного нормального законов распределения. Для этого случая плотность распределения вероятности записывается в виде

$$f(t) = C_1 \lambda e^{-\lambda t} + C_2 \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}, \tag{3.23}$$

где a и σ - параметры нормального закона.

Наибольшей трудностью при оценке параметров суперпозиционных законов распределений является определение доли отдельных компонентов в смеси. При четко налаженной системе сбора информации с фиксацией физической природы отказов, оценку параметров суперпозиционного закона распределения можно извлечь из опытных данных. Например, для суперпозиции экспоненциального и усеченного нормального законов распределения параметры C_1 и C_2 можно получить, подразделив находя-

щиеся под наблюдением изделия на две группы, исходя из оценки видов отказов.

Отсюда получим

$$C_1 = \frac{N_1}{N},$$

где N - количество изделий, находящихся под наблюдением;

N_1 - количество изделий отнесенных к первой группе.

Наконец, долю отдельных компонентов в смеси можно определить методом имитационного моделирования, с помощью которого происходит поиск оптимального решения путем последовательного приближения, подбирая те или иные структуры и численные значения факторов.

3.3. Накопление и обработка статистических данных о надежности оборудования

Для получения полных и достоверных данных о надежности нефтепромыслового оборудования, прогнозирования и нормирования надежности, а также для разработки эффективных мер по повышению надежности на всех стадиях - при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования, необходимо иметь сведения о количестве, характере и последствиях отказов за рассматриваемый период эксплуатации. При этом статистические исследования надежности должны сочетаться с изучением физических причин, вызывающих те или иные отказы оборудования.

Статистическую информацию об отказах нефтепромыслового оборудования можно получить тремя путями:

- 1) использовать статистические данные об эксплуатации оборудования в реальных условиях;
- 2) использовать данные специальной подконтрольной эксплуатации определенного количества оборудования;
- 3) использовать данные специальных испытаний на надежность.

Основным преимуществом статистических данных об отказах, полученных в реальных условиях эксплуатации, является то, что в этом случае наиболее полно отражаются режимы работы оборудования, влияние конструкции и технологии изготовления, а также правил эксплуатации на надежность.

Статистическая информация об отказах будет еще более

объективной и полной, если статистические данные об отказах в реальных условиях эксплуатации оборудования получены путем организации подконтрольной эксплуатации.

При специальных испытаниях на надежность можно широко варьировать нагрузки и режимы работы опытных образцов изделий и определять показатели надежности для этих уровней нагрузок и режимов. При этом эксплуатация машин и механизмов организуется в строгом соответствии с требованиями технической документации и сопровождается контролем технического состояния основных сборочных единиц и сопряжений деталей каждой машины специально подготовленным персоналом.

Во всех отмеченных случаях, объектами наблюдений должны явиться однотипные изделия, не имеющие конструктивных различий и изготовленные по единой технологии. Выбор места проведения наблюдений должен обеспечивать наиболее характерные условия эксплуатации и режимы работ, предусмотренные нормативно-технической документацией.

Проведение работ по сбору и обработке информации о надежности изделий должно обеспечить возможность решения следующих задач:

- определение причин возникновения отказов;
- выявление деталей, сборочных единиц и комплектующих изделий, лимитирующих надежность изделий;
- установление и корректировку нормируемых показателей надежности изделий и их элементов;
- выявление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность изделий;
- определение экономической эффективности от повышения надежности изделий.

Планы испытаний на надежность, включающие порядок проведения испытаний, критерии их прекращения и число объектов наблюдения, принимаются в соответствии с стандартом [35].

План испытаний должен содержать следующее:

- признаки отказов изделий;
- определяющие для данного изделия показатели надежности;
- условия испытаний (климатические условия, механические нагрузки, последовательность и длительность режимов);
- способ контроля работоспособности (обычный эксплуатационный или специальный испытательный, непрерывный или периодический);

- правила обращения с отказавшими изделиями (отказавшие изделия не заменяются до конца испытаний - план типа U , заменяются немедленно после отказа - план типа R , восстанавливаются в ходе испытаний - план типа M);

- число испытываемых изделий N ;

- правила окончания испытаний (по истечении заданного времени T , после наступления r -го отказа, после отказа всех изделий, по истечении суммарного по всем объектам времени или наработки T_z).

Для обозначения планов испытаний применяется символика с тремя позициями, характеризующими число изделий, правила обращения с отказавшими изделиями, правила окончания испытаний. Характеристика основных планов испытаний приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Термины и определения планов испытаний на надежность

Индекс плана	Определение
[NUT]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают при истечении времени испытаний или наработки T для каждого не отказавшего объекта. Примечание: Одним из частных случаев плана [NUT] является план [NUZ], где $z = \min(t_i, \tau_i)$; $i = 1, 2, \dots, N$; t_i - наработка до отказа i-го объекта; τ_i - наработка до снятия с испытания работоспособного i-го объекта.
[NUr]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r. Примечание: При $r = N$ имеем план [NUN].
[NRT]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов, отказавшие во время испытаний объекты заменяют новыми, испытания прекращают при истечении времени испытаний или наработки T для каждой из N позиций.

	Примечание: Каждый из N объектов занимает определенную позицию (стенд; испытательную площадку и т. д.), применительно к которой в дальнейшем исчисляется продолжительность испытаний T, независимо от замен объектов, отказавших на данной позиции.
[NRr]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов, отказавшие во время испытаний объекты заменяют новыми, испытания прекращают, когда число отказавших объектов, суммарное по всем позициям, достигло г.
[NMT]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, после каждого отказа объект восстанавливают, каждый объект испытывают до истечения времени испытаний или наработки T.
[NMr]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, после каждого отказа объект восстанавливают, испытания прекращают, когда суммарное по всем объектам число отказов достигло г.
Буквы U, R, M в обозначениях планов испытаний указывают степень и характер восстановления объектов: U - невозстанавливаемые и незаменяемые при испытаниях в случае отказа; R - невозстанавливаемые, но заменяемые при испытаниях в случае отказа; M - восстанавливаемые при испытаниях в случае отказа; N - объем выборки; T - время испытаний или наработка; г - число отказов или отказавших объектов.	

Выбор планов испытаний зависит от типа объекта, целей наблюдения, оцениваемых показателей надежности, условий эксплуатации с учетом экономической целесообразности и технической необходимости.

Исходными данными для выбора плана контроля показателей надежности служат: риск изготовителя α , риск потребителя β , браковочный уровень надежности R_β и приемочный уровень на-

дежности R_a . При этом вероятность приемки изделий с приемочным уровнем надежности R_a равна $1 - \alpha$, а вероятность приемки изделий с браковочным уровнем надежности R_b равна β .

При установлении интервала $[R_b, R_a]$ в качестве R_b служит значение показателя, заданное в стандарте или технических условиях на изделие.

В экономически обоснованных случаях допускается размещать интервал $[R_b, R_a]$ относительно требуемого значения показателя надежности R , заданного в стандарте или технических условиях на изделие, по согласованию между изготовителем и потребителем.

Число объектов для испытаний устанавливают с учетом условия получения за время испытаний наработки, достаточной для контроля показателей надежности с заданной точностью и достоверностью.

Статистическая информация об отказах оборудования может оказаться недостоверной или неполной. Иногда в статистических данных обнаруживаются грубые ошибки наблюдений, которые существенно влияют на числовые характеристики изучаемой случайной величины, а следовательно, и на оценки показателей надежности, особенно при многочисленных выборках. Может случиться, что отказы регистрировались с перерывами. Прежде чем использовать статистическую информацию для анализа надежности изделий и вычисления количественных показателей, необходимо убедиться в ее достоверности, полноте и непрерывности, т.е. проверить качество полученной статистической информации.

При этом чаще всего возникает необходимость в решении известных в математической статистике задач о проверке гипотез, связанных с сопоставлением между собой различных выборок (части совокупности единиц продукции, взятых из исследуемой партии [32]).

Таким образом, обработка статистических данных включает два самостоятельных этапа: определение эмпирической функции или плотности распределения и проверка гипотезы о законе распределения изучаемой случайной величины.

Все работы по оценке фактического уровня надежности состоят из четырех основных этапов:

а) накопление статистической информации в реальных условиях эксплуатации или при моделировании процесса эксплуатации

(путем проведения лабораторных, стендовых, а также ускоренных испытаний);

б) анализ и обобщение полученных статистических данных с учетом специфики эксплуатации каждого из объектов;

в) выбор и обоснование показателей для оценки надежности изделий в зависимости от их назначения и от того, каковы последствия отказов этих изделий;

г) статистическая обработка полученных эмпирических данных об отказах с целью определения закономерностей, присущих потоку отказов анализируемых изделий.

Все перечисленные этапы неразрывно связаны между собой и нарушение методики на одном из них может существенно исказить результаты исследований.

Так например, имеются случаи, когда наблюдения за некоторыми объектами прекращаются раньше возникновения отказа. В результате в выборочные данные включаются и наработки неотказавших объектов. Выборки такого типа получили наименование цензурированных, а событие, заключающееся в прекращении наблюдений за работоспособным объектом, называется цензурированием.

Исходными данными для оценки показателей надежности при цензурированной выборке являются:

- выборочные значения наработок до отказа $t_1, t_2, \dots, t_r$;
- выборочные значения наработок до цензурирования

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$;

- число наработок до отказа r ;
- число наработок до цензурирования n ;
- объем выборки $N = r + n$.

Порядок оценки показателей надежности при цензурированных выборках приведен в работе [4].

Журнал учета наработок и отказов изделий в качестве обязательных сведений должен содержать:

- паспортные данные об изделии;
- наименование эксплуатирующего предприятия;
- режим работы и условия эксплуатации;
- дату, время включения и выключения изделия;
- наименование отказавшей детали или сборочной единицы;
- наработку с начала эксплуатации (в единицах времени или в объеме выполненной работы);

- описание характера, внешнего проявления и предполагаемой причины отказа;
- время отыскания и устранения отказа;
- способ устранения отказа.

При решении ряда теоретических и практических вопросов надежности изделий, таких как оценка точности результатов обработки статистических данных, нахождение доверительных интервалов для неизвестных показателей надежности и т.п., необходимо знать законы распределения изучаемых случайных величин. По имеющейся статистической информации можно лишь предположительно судить о законе распределения изучаемой случайной величины, причем можно выдвинуть несколько гипотез о ее функции распределения. Для проверки гипотез о законе распределения вероятностей случайных величин, т.е. для количественной оценки степени согласованности статистических данных с некоторой теоретической (гипотетической) функцией распределения, применяются так называемые критерии согласия. Статистические данные в этом случае обрабатываются в следующем порядке:

- 1) определяется эмпирическая функция плотности распределения;
- 2) выдвигается одна или несколько гипотез о функции распределения, исходя из вида эмпирической функции плотности распределения и других условий и признаков, при которых следует ожидать появления того или иного закона распределения;
- 3) вычисляются числовые характеристики случайной величины и оцениваются параметры гипотетических функций распределения;
- 4) эмпирическая функция плотности распределения выравнивается по одной или нескольким теоретическим кривым;
- 5) проводится сравнение эмпирической кривой распределения с теоретической по одному из критериев согласия;
- 6) выбирается теоретическая функция распределения, дающая наилучшее согласие с эмпирическими данными.

Методика определения эмпирической функции плотности распределения и последовательность вычисления числовых характеристик случайных величин по статистическим данным рассмотрены, например, в работах [11, 14, 32].

Исходя из условий эксплуатации, к надежности нефтепромыслового оборудования предъявляются повышенные требования, так как внезапный отказ функционирования многих деталей и агрегатов (таких как насосные штанги, скважинные насосы, задвиж-

ки фонтанной арматуры и другие) может привести к тяжелым осложнениям и авариям. Необходимо также отметить трудность проведения ремонтных работ в условиях разбросанности нефтяных и газовых скважин. Поэтому отказы, для устранения которых требуется проведение сложных ремонтных работ, практически приводят к вынужденной замене отказавшего оборудования.

Организация наблюдений в условиях эксплуатации нефтепромыслового оборудования позволяет накопить необходимые статистический материал и получить количественные показатели надежности по отдельным деталям и составным частям оборудования.

Основные причины отказов деталей нефтепромыслового оборудования выявляются путем обследования изношенных деталей и узлов при проведении ремонта, проверки качества изготовления и соответствия деталей техническим требованиям, анализа рабочих чертежей и нормативно-технической документации.

В условиях эксплуатации наблюдения производятся за серийными изделиями и изделиями, подготовленными к изучению в условиях эксплуатации. Все отказавшие во время эксплуатации или замененные при техническом обслуживании и ремонте изношенные детали подвергаются тщательному обследованию и изучению. Устанавливается состояние рабочих поверхностей деталей, регистрируются обнаруженные повреждения, виды изнашивания и разрушения.

Во время наблюдений регистрируются режимы работы оборудования и устанавливаются случаи перехода к аварийным режимам: перегрузкам, перегревам и т.п.

По результатам обследования изношенных деталей во время эксплуатации, с учетом режимов работы оборудования, устанавливаются возможные причины отказов оборудования, с изучением качественного состояния и свойств отказавших деталей.

Ниже, на основе статистических данных, приведены в виде примера результаты оценки показателей безотказности и ремонтнопригодности передвижных подъемных установок.

3.4. Результаты оценки безотказности и ремонтнопригодности нефтепромыслового оборудования

Основные требования, предъявляемые к надежности подъемных установок, связаны с обеспечением как прямых функций по

назначению (спуско-подъемные операции, разбуривание песчаных пробок, выполнение ловильных и других работ), так и передвижения самой подъемной установки. Отказ, приводящий к невыполнению указанных работ и вызывающий необходимость проведения какого-либо вида непланового ремонта, является отказом самой подъемной установки или ее транспортной базы.

3.4.1. Установки АЗИНМАШ-43П

В качестве исходных данных для оценки надёжности подъёмной установки АЗИНМАШ-43П приняты показатели, характеризующие эффективность установок в эксплуатации [17]. На основе этого в табл. 3.2 и 3.3. приведены результаты определения наработок на отказ, среднего времени восстановления и комплексных количественных показателей надёжности.

Анализ приведенных данных показал следующее:

1. Средняя суммарная наработка установок составляет 9551ч при среднеквадратическом отклонении 1927ч. При этом по установкам средняя наработка на отказ составляет 221...519ч (см.табл.3.3), т.е. изменяется в достаточно широких пределах.

2. Затраты времени на неплановые текущие ремонты также значительно различаются (при среднем значении 2546ч и среднеквадратическом отклонении 1464ч). Количество отказов, связанных с проведением неплановых текущих ремонтов, составляет от 20 до 32, что при указанных в табл. 3.3 затратах времени на устранение этих отказов приводит к значительному колебанию среднего времени восстановления ($\bar{\tau}_в = 5,8...243$ ч). Это находит отражение в полученных значениях комплексного показателя надёжности - коэффициента готовности ($K_r = 0,538...0,988$).

Затраты времени на техническое обслуживание и плановые текущие ремонты весьма различаются (от 32 до 1040ч), что отражается на значениях комплексного показателя надёжности - коэффициента технического использования ($K_{тн} = 0,499...0,984$).

Интерес представляет характер изменения основных количественных показателей надёжности: вероятности безотказной работы $P(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$. Для этого в табл.3.2, по данным работы [17] приведены исходные данные по лебёдке установки АЗИНМАШ-43П - пределы интервалов наработок, количество отказов в каждом интервале, а также результаты вычисления количеств

Результаты оценки количественных показателей безотказности лебедки
подъёмной установки АЗИНМАШ-43П.

№ интервала	Интервал времени, ч	Середина интервала t_{cp} , ч	Количество случаев Δn_i	$n_i = \sum_{i=1}^{i-1} \Delta n_i$	Частота $u_i = \frac{\Delta n_i}{N}$	$P_i = \frac{N - n_i}{N}$	$\lambda_i = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \Delta t}$
1	0-100	50	3	0	0.012	1.000	0.00012
2	100-200	150	11	3	0.045	0.988	0.00045
3	200-300	250	10	14	0.041	0.943	0.00043
4	300-400	350	14	24	0.057	0.903	0.00063
5	400-500	450	20	38	0.081	0.846	0.00096
6	500-600	550	18	58	0.073	0.765	0.00095
7	600-700	650	22	76	0.089	0.692	0.00129
8	700-800	750	21	98	0.085	0.603	0.00141
9	800-900	850	20	118	0.081	0.522	0.00155
10	900-1000	950	26	138	0.105	0.441	0.00238
11	1000-1100	1050	45	164	0.182	0.336	0.00542
12	1100-1200	1150	22	209	0.089	0.154	0.00579
13	1200-1300	1250	9	231	0.036	0.065	0.00563
14	1300-1400	1350	4	240	0.016	0.028	0.00571
15	1400-1500	1450	2	244	0.008	0.012	0.00667
Итого			$N=247$		1.000		

Таблица 3.3.

Результаты оценки ремонтпригодности и комплексных показателей надёжности
подъёмной установки АЗИНМАШ-43П

Условный № подъёмной установки	Суммарная наработка установки $T_{\text{сум}}$, ч	Количество отказов	Суммарное время (ч), затраченное на		Средняя наработка на отказ $\bar{T}$, ч	Среднее время восстанов- ления $\bar{t}_n$, ч	Коэффициенты	
			ТО и плановые ТР	неплано- вые ТР			K_r	$K_{\text{тн}}$
1	6225	22	912	5350	283	243	0.538	0.499
2	6406	29	864	5134	221	117	0.555	0.516
3	7757	25	368	2628	310	105	0.754	0.728
4	8528	20	416	1984	426	99	0.811	0.780
5	8857	25	944	2736	354	109	0.764	0.706
6	9016	26	416	2832	347	109	0.762	0.736
7	9404	27	976	2576	348	95	0.785	0.725
8	9531	24	224	2016	397	84	0.825	0.810
9	9631	31	655	2608	311	84	0.788	0.747
10	10772	27	96	1168	399	43	0.902	0.895
11	11263	22	48	128	512	5.8	0.988	0.984
12	11427	22	32	192	519	8.7	0.983	0.981
13	11655	32	1040	3760	364	117	0.756	0.708
14	13248	29	560	2544	457	88	0.839	0.810
Среднее	9551	26	539	2546	370	99	0.789	0.759

венных показателей надёжности $P(t)$ и $\lambda(t)$. На рис.3.2 приведены зависимости вероятности безотказной работы и интенсивности отказов лебёдки от наработки установки АЗИНМАШ-43П. Как видно из приведённых результатов обработки статистических данных, начиная с интервала времени эксплуатации 500...600ч отмечается значительное уменьшение вероятности безотказной работы лебёдки.

В целом полученные результаты указывают на недостаточный уровень безотказности, высокие значения затрат времени на устранение отказов и, как следствие, низкие значения комплексных показателей надёжности подъёмных установок АЗИНМАШ-43П.

Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ от наработки установки АЗИНМАШ-43П.

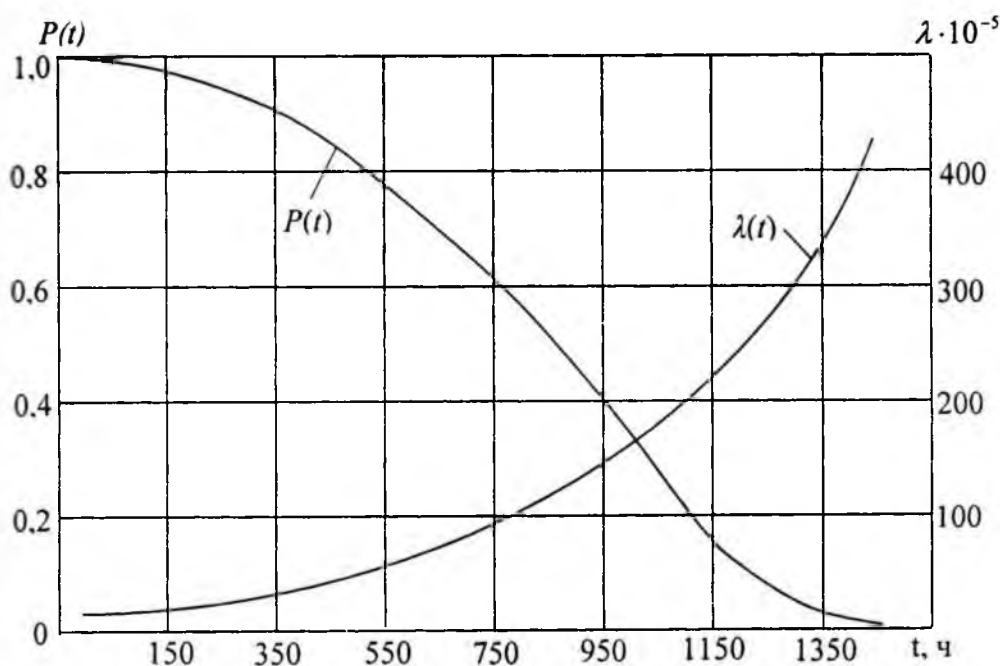


Рис.3.2.

3.4.2. Установки АЗИНМАШ-37А, УПТ-32 и ЛПТ-8

Для учета отказов и наработок было взято под наблюдение по плану [NRT] 40 установок АЗИНМАШ-37А и по 30 установок УПТ-32 и ЛПТ-8. Количество отказов и процентные их соотношения по составным частям подъемных установок приведены в табл.3.4 [16].

Как следует из указанных данных, основными сборочными единицами и агрегатами, определяющими надежность подъемных установок, являются: основная лебедка, коробка перемены передач, фрикционная муфта, а также система телескопической вышки и талевая система (установок АЗИНМАШ-37А и УПТ-32).

Следует также отметить интенсивное изнашивание накладок тормозной ленты и тормозного шкива; первая подвергается замене при плановом техническом обслуживании, а второй - при плановом ремонте, исходя из ее состояния.

Низкий ресурс имеют также цилиндрические и конические шестерни, а также зубчатая муфта коробок передач.

Одной из основных систем, определяющих надежность функционирования подъемных установок АЗИНМАШ-37А и УПТ-32, является гидросистема, предназначенная для приведения в действие вспомогательных механизмов: гидравлических домкратов подъема вышки, лебедки выдвижения верхней секции вышки, подъема ног задней опоры вышки, автоматов для свинчивания и развинчивания НКТ. Наименее долговечными элементами гидравлического домкрата являются уплотняющие манжеты и резиновые кольца, отказ которых приводит к течи масла при подаче его в верхнюю и нижнюю полости (при подъеме и опускании вышки) гидравлического домкрата.

Одним из характерных отказов подъемных установок является отказ фрикционной муфты. Наиболее часто в этом узле отказывают уплотняющие манжеты (которые теряют герметичность) и диафрагма.

Высокие требования предъявляются к гидравлическому тормозу, предназначенному для автоматического регулирования скорости подъема и опускания вышки, в частности для обеспечения максимальной скорости в начале подъема (опускания) и замедления скорости движения вышки до безопасной, в конце подъема (опускания) с целью плавной посадки на заднюю опору. Потеря работоспособности кольца штуцера, а также засорение золотника являются характерными причинами отказов данного узла.

Таблица 3.4.

Сведения об отказах установок АЗИНМАШ-37А, УПТ-32 и ЛПТ-8

Наименование составных частей	Подъемные установки					
	АЗИНМАШ-37А		УПТ-32		ЛПТ-8	
	количество отказов	процентное соотношение, %	количество отказов	процентное соотношение, %	количество отказов	процентное соотношение, %
Основная лебедка	22	17,0	25	23,5	16	31,4
Талевая система	11	8,6	5	4,7	-	-
Телескопическая вышка	12	9,3	15	14,0	-	-
Коробка перемены передач	21	16,3	10	9,4	6	11,8
Коробка отбора мощности	4	3,1	3	2,8	3	5,9
Тормозная система (без тормозной ленты)	6	4,7	1	0,9	-	-
Фрикционная муфта	3	2,3	1	0,9	14	27,5
Конический редуктор	6	4,7	1	0,9	-	-
Пневмосистема	4	3,1	4	3,7	1	1,9
Гидросистема	10	7,7	11	10,0	1	1,9
Электрооборудование	20	15,5	21	19,8	2	3,9
Компрессор	10	7,7	10	9,4	8	15,7
Всего:	129	100%	107	100%	51	100%

В подъемной установке ЛПТ-8 значительное количество отказов (см.табл.3.4) приходится на долю элементов трансмиссии: коробки перемены передач, коробки отбора мощности и фрикционной муфты (45,2%), в то время как количество отказов, приходящееся на долю аналогичных узлов установки УПТ-32, составляет 13,1%. Причина такой разницы в количестве отказов объясняется тем, что подъемной установкой ЛПТ-8 (без вышечного сооружения) осуществляется ремонт скважин через стационарную вышку, а это часто приводит к перегрузке элементов трансмиссии.

В табл.3.5 приведены данные о надежности восстанавливаемых сборочных единиц подъемных установок АЗИНМАШ-37А, ЛПТ-8 и УПТ-32. Функции плотности распределений наработок между отказами и времени восстановления приведены на рис.3.3.

Как видно из приведенных статистических данных, средняя наработка между отказами ряда сборочных единиц подъемных установок достаточно высокая, в то же время отдельные узлы и системы (например, электрооборудование, гидравлическая и пневматическая системы установки ЛПТ-8; конический редуктор и пневмосистема установки УПТ-32) имеют относительно низкую среднюю наработку между отказами.

Среднее время восстановления в отдельных случаях значительно, особенно некоторых систем установок УПТ-32 и ЛПТ-8: фрикционной муфты, коробки перемены передач и коробки отбора мощности (см. табл.3.5).

Эксплуатационные наблюдения за подъемными установками показали, что распределения наработок на отказ установок АЗИНМАШ-37А, УПТ-32 и ЛПТ-8 подчиняются экспоненциальному закону распределения. А распределения времени восстановления описываются: для установок АЗИНМАШ-37А, УПТ-32 - экспоненциальным законом распределения; ЛПТ-8 - законом распределения Вейбулла (табл.3.6).

Из табл.3.6 следует, что преобладающим законом распределения времени безотказности и времени восстановления подъемных установок является экспоненциальный закон. Известно, что близость функции плотности распределения времени безотказной работы к экспоненциальному распределению характерно для изделий, у которых преобладают внезапные отказы [6, 11].

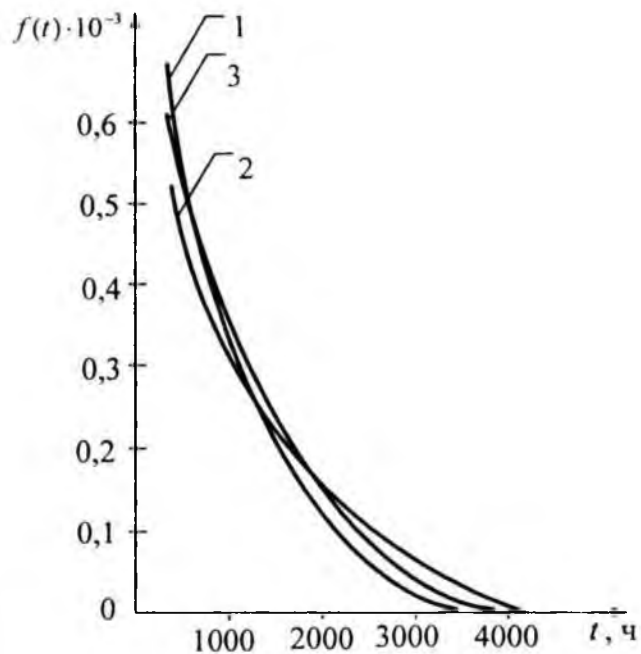
Наличие в установках недостаточно отработанных узлов и деталей гидравлической и пневматической систем, электрооборудования, а также отдельных деталей (диафрагма фрикционной муфты,

Таблица 3.5.

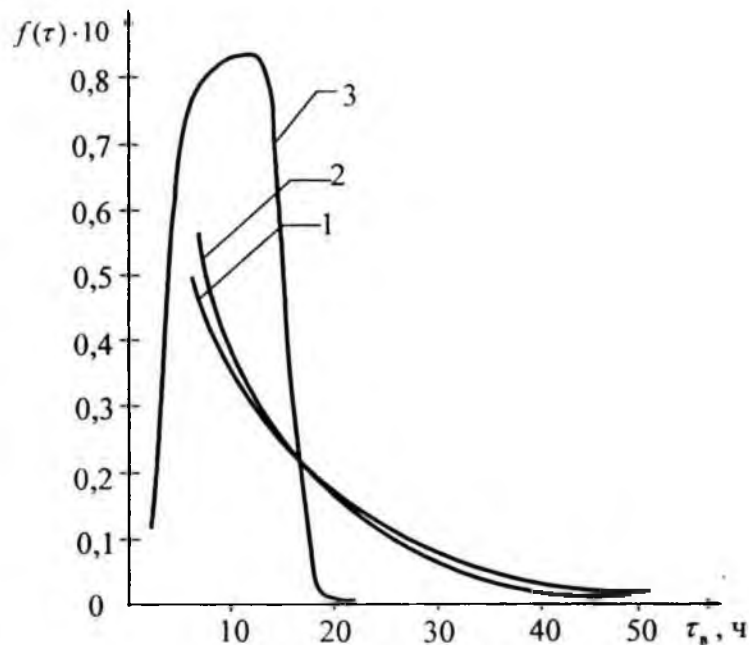
Средние значения наработок между отказами и времени восстановления
подъемных установок

Наименование основных узлов	Подъемные установки					
	АЗИНМАШ-37А		УПТ-32		ЛПТ-8	
	средняя наработка между отказами $\bar{T}$, ч.	среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч	средняя наработка между отказами $\bar{T}$, ч.	среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч	средняя наработка между отказами $\bar{T}$, ч.	среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч
Основная лебедка	1940	5,8	944	8,8	970	10,3
Талевая система	809	5,7	212	2,5	-	-
Телескопическая вышка	933	8,6	619	10,7	-	-
Коробка перемены передач	1206	8,6	450	25,1	1312	8,1
Коробка отбора мощности	1417	9,0	678	14,3	1326	9,0
Тормозная система	1097	4,5	4512	8,0	-	-
Фрикционная муфта	517	5,2	2093	41,0	857	8,0
Конический редуктор	1123	7,0	202	2,0	-	-
Пневмосистема	590	4,2	275	4,5	264	2,0
Гидросистема	710	3,5	404	4,8	120	4,0
Электрооборудование	1801	3,0	836	2,4	330	11,0
Компрессор	720	6,0	477	5,5	3367	9,0

Функции плотностей вероятностей распределения наработок на отказ (а) и времени восстановления (б) подъемных установок



а)



б)

1- АЗИНМАШ-37А; 2- ЛПТ-8; 3- УПТ-32

Рис. 3.3.

Таблица 3.6.

Результаты статистической обработки информации о надежности подъемных установок (без учета отказов транспортной базы)

Подъемные установки	Статистические значения параметров распределения безотказности				Статистические значения параметров восстановления	
	Закон распределения	$\bar{T}^*$, ч	σ^* , ч	ν^*	Закон распределения	$\bar{t}_n^*$, ч
АЗИНМАШ-37А	экспоненциальный	1138	926	0,814	экспоненциальный	9,90
УПТ-32	экспоненциальный	1163	1069	0,919	экспоненциальный	9,26
ЛПТ-8	экспоненциальный	1623	1404	0,865	Вейбулла	9,20

уплотняющая манжета вертлюжка и др.) указывают на возможность внезапных отказов.

Кроме того, необходимо учитывать, что время безотказной работы сложной системы может подчиняться экспоненциальному закону и в тех случаях, когда этому закону не подчиняются подсистемы, но отказавшие элементы восстанавливаются в процессе работы системы [24]. Последнее также характерно для передвижных подъемных установок.

На основе анализа статистической информации о надежности деталей и составных частей подъемных установок АЗИНМАШем были произведены в них некоторые конструктивные изменения. Эти изменения были связаны в основном с устранением наиболее частых отказов вышеперечисленных узлов, которые приводили к значительным простоям установок и требовали большей затраты времени при разборке и замене отказавшего узла.

В подъемной установке АЗИНМАШ-37А были осуществлены ряд конструктивных изменений. К ним относятся: замена чугунного тормозного шкива на стальной и применение формованных тормозных колодок из материала ретинакс взамен лент с фerraдо; введе-

ние более безотказного (за счет исключения недостаточно надежного пневмопривода) и удобного автоматизированного механизма выдвижения упоров верхней секции вышки; внедрение кабины оператора с увеличенным смотровым окном; увеличение ресурса коробки перемены передач и привода гидронасоса.

В подъемных установках УПТ-32 и ЛПТ-8 чугунный тормозной шкив также заменен на стальной; внедрена новая конструкция верхнего смотрового окна увеличенных размеров с установкой на нем стеклоочистителя; компрессор установлен под капотом двигателя трактора, что повысило его безотказность при эксплуатации в холодное время года.

Кроме того, в установке УПТ-32 применен автоматизированный механизм выдвижения упоров верхней секции вышки, перенесено управление автоматом подземного ремонта (АПР), применяемым для свинчивания-развинчивания насосно-компрессорных и бурильных труб при спускоподъемных операциях в ремонте скважин. Введен узел регулировки конической пары трансмиссионного вала, введено ограждение труб гидросистемы. А в установке ЛПТ-8 изменено размещение откидных упоров, позволившее улучшить устойчивость лебедки.

Наряду с перечисленным повышена технологичность изготовления отдельных деталей и узлов подъемных установок, что позволило в целом повысить качество их изготовления [16].

4. Структурный анализ надежности технических систем

4.1. Проектный расчет надежности

Для исследования свойств технических систем чаще всего применяется структурный анализ. Особенно распространено его использование в теории надежности.

Как правило, надежностные структуры представляют в графических (блочные схемы, графы) и функциональных (таблицы структуры, аналитическая запись) формах.

Структурные графы можно использовать для развития и преобразования существующих структур, а также для раскрытия внутренних связей элементов и исследования объекта в целом, установления закономерностей этих связей и возможности управления ими для достижения определенных целей.

Формализованный метод структурного анализа надежности применяется при проектировании сборочных единиц технического объекта, когда необходимо как определение структурной схемы варианта конструкции, так и получение оценки.

Последовательным в смысле надежности, называют такое соединение элементов в системе, при котором отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы.

Для системы, состоящей из n последовательно соединенных невосстанавливаемых элементов (рис. 4.1), случайная наработка до отказа системы равна минимальному значению наработок ее элементов. Если элементы являются независимыми и известны вероятности безотказной работы каждого элемента за заданное время t_0 , то вероятность безотказной работы системы будет равна

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^n P_i(t_0). \quad (4.1)$$

Последовательное соединение элементов сложной технической системы

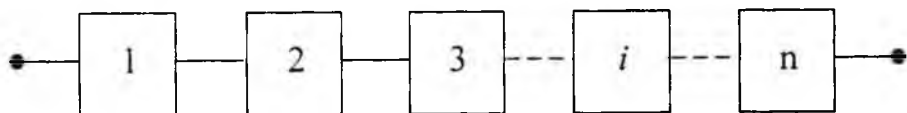


Рис. 4.1.

При значениях вероятности безотказной работы, близких к единице, можно использовать приближенные зависимости [49]:

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^n P_i(t_0) = 1 - \sum_{i=1}^n [1 - P_i(t_0)]; \quad (4.2)$$

$$P^n(t_0) = 1 - n[1 - P(t_0)]; \quad (4.3)$$

$$\sqrt[n]{P(t_0)} = 1 - \frac{[1 - P(t_0)]}{n}. \quad (4.4)$$

При известной вероятности безотказной работы точное значение наработки до отказа системы можно определить по формуле

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (4.5)$$

Если известно, что наработка до отказа элементов распределена по экспоненциальному закону, то

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i t). \quad (4.6)$$

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t_0) = \exp\left(-t_0 \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) = \exp(-\Lambda t_0), \quad (4.7)$$

где λ_i и Λ - соответственно интенсивности отказов элементов и системы.

Характеристики надежности систем можно получить, если известны интенсивность отказов λ_i всех элементов. Если в реальных конструкциях систем используются однотипные элементы, работающие одновременно, то тогда

$$P(t_0) = \exp\left(-t_0 \sum_{i=1}^n m_i \lambda_i\right); \quad (4.8)$$

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^r m_i \lambda_i}, \quad (4.9)$$

где m_i и λ_i - соответственно число и интенсивность отказов i -го типа;

r - число типов элементов.

Как правило, не все элементы работают непрерывно от момента начала системы и до окончания. Поэтому, принимая допущение о независимости отказов элементов, вероятность безотказной работы системы можно вычислить по зависимости

$$P(t_0) = P_1(t_1) \cdot P_2(t_2) \dots P_n(t_n) = \prod_{i=1}^n P_i(t_i), \quad (4.10)$$

где $P_i(t_i)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента за время $t_i \leq t_0$.

Расчет надежности восстанавливаемых систем с последовательным соединением элементов основывается на допущении о том, что все распределения наработки до отказа и времени восстановления отдельных элементов являются экспоненциальными. Это допущение справедливо, если средняя наработка до отказа элементов системы значительно больше времени их восстановления. На практике такое условие обычно выполняется.

Расчетные зависимости показателей надежности восстанавливаемых систем с последовательным соединением элементов приводятся в табл. 4.1, где μ_i - интенсивность восстановления, 1/ч; τ_{wi} - время восстановления при i -ом отказе элемента, ч; $T_{\text{перл}}$ - суммарное время, затраченное на проведение всех предусмотренных видов обслуживания за время эксплуатации изделия, ч; $T_{\text{экспл}}$ - время эксплуатации изделия, ч [39, 49].

Параллельным соединением элементов (рис.4.2) называют такое соединение, при котором отказ системы наступает после отказа всех элементов, входящих в систему. Параллельное соединение элементов часто называют резервным соединением (см.рис. 4.3).

Резервирование элементов является одним из эффективных способов повышения надежности систем. Применение находят общее, раздельное (поэлементное) резервирование, а также резервирование замещением. Достоинство резервирования при постоянно включенном резерве (рис.4.3а) состоит в его простоте, так как в этом случае переключающие устройства не требуются. Его недостаток состоит в том, что при отказе какого-либо одного элемента могут нарушаться режимы работы остальных.

Включение резерва замещением (рис.4.3б) имеет следующие преимущества: имеется возможность использовать один резервный элемент для нескольких рабочих; не нарушаются режимы работы резервных элементов при отказе остальных. Существенный недостаток резервирования замещением и поэлементного резервирования состоит в том, что для их реализации необходимы переключающие устройства.

Таблица 4.1.

Показатели надежности восстанавливаемой системы с
последовательным соединением элементов

Показатели надежности системы	Точное значение	Приближенное значение
Средняя наработка на отказ	$\bar{T} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^r \lambda_i}$	
Вероятность безотказной работы	$P(t_0) = \exp(-\Lambda t_0)$	$P(t_0) = 1 - \Lambda t_0$
Вероятность отказа	$Q(t_0) = 1 - \exp(-\Lambda t_0)$	$Q(t_0) = \Lambda t_0$
Среднее время восстановления	$\bar{\tau}_s = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$	
Коэффициент готовности	$K_r = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{\tau}_s} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$	$K_r = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}$
Коэффициент технического использования	$K_{\text{ти}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{\text{вп}} + T_{\text{перл}}}{T_{\text{эксп}}}$	
Коэффициент оперативной готовности	$K_{\text{ор}} = K_r \cdot P(t_0) = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{\tau}_s} P(t_0)$	$K_{\text{ор}} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \right) (1 - \Lambda t_0)$

Параллельное соединение элементов сложной технической системы

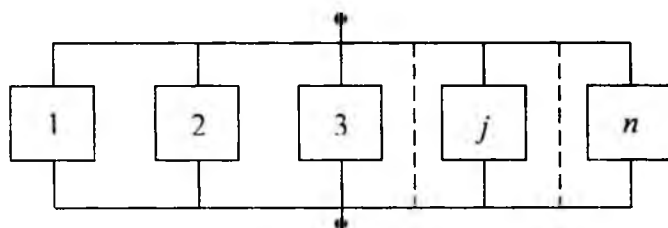
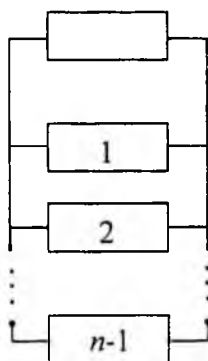
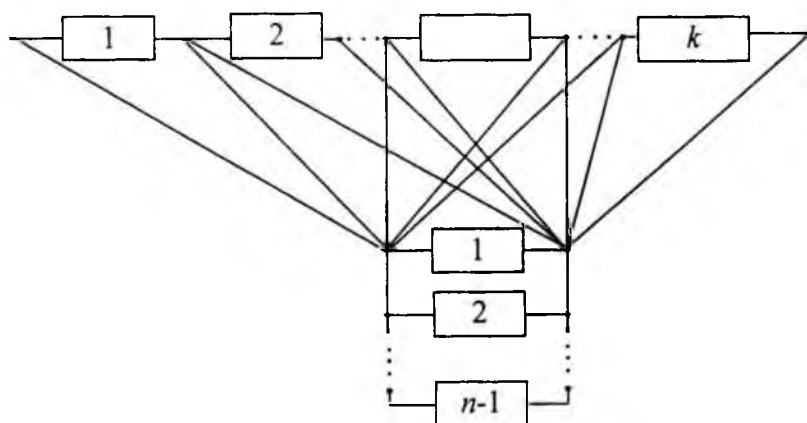


Рис. 4.2.

Резервирование одного элемента (а) и группы из k элементов (б) $n-1$ резервными элементами, работающими в нагруженном режиме



а)



б)

Рис.4.3.

В зависимости от выполняемой задачи применяется нагруженное (горячее) и холодное резервирование. Горячее резервирование применяется в случаях, когда не допускаются перерывы времени на переключение отказавшего элемента на резервный. Холодное резервирование применяется тогда, когда требуется увеличение ресурса работы элемента и допускается время на переключение отказавшего элемента на резервный.

Если система состоит из ряда параллельно соединенных n элементов (см. рис. 4.2), то вероятность отказа системы равна

$$Q_n(t) = q_1(t)q_2(t)\dots q_n(t). \quad (4.11)$$

При условии одинаковой ненадежности элементов

$$Q_n(t) = q^n(t), \quad (4.12)$$

где n - число параллельно соединенных элементов.

Тогда вероятность безотказной работы системы будет равна

$$P_n(t) = 1 - Q_n(t) = 1 - q^n(t).$$

Если известна вероятность отказа элемента $q(t)$ и требуется определить число элементов, при котором $Q_n(t)$ не будет превосходить заданной величины $Q(t)$, т.е.

$$q^n(t) \leq Q(t), \quad (4.13)$$

то тогда из этого неравенства получим

$$n \geq \frac{\ln \frac{1}{Q(t)}}{\ln \frac{1}{q(t)}}. \quad (4.14)$$

Если же требуется, задавшись числом резервных элементов, определить какая допустима ненадежность каждого из них, то получим

$$q(t) = \sqrt[n]{Q(t)}. \quad (4.15)$$

Для случая экспоненциального закона, если надежность элементов близка к единице, то

$$P_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \approx 1 - \lambda_k t, \quad (4.16)$$

и, следовательно

$$q_k(t) = 1 - \exp(-\lambda_k t) \approx \lambda_k t. \quad (4.17)$$

Тогда

$$Q_n \approx (\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n) t^n. \quad (4.18)$$

Для равнонадежных элементов

$$Q_n \approx (\lambda)^n, \quad (4.19)$$

где $\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$.

Ниже, в виде примера, дан структурный анализ и расчет надежности манифольдов противовыбросового оборудования на стадии проектирования.

4.2. Проектный расчет надежности манифольдов противовыбросового оборудования

Манифольд противовыбросового оборудования является ответственным узлом, выход из строя которого влечет за собой серьезное расстройство технологического цикла при бурении и ремонте вплоть до потери скважины.

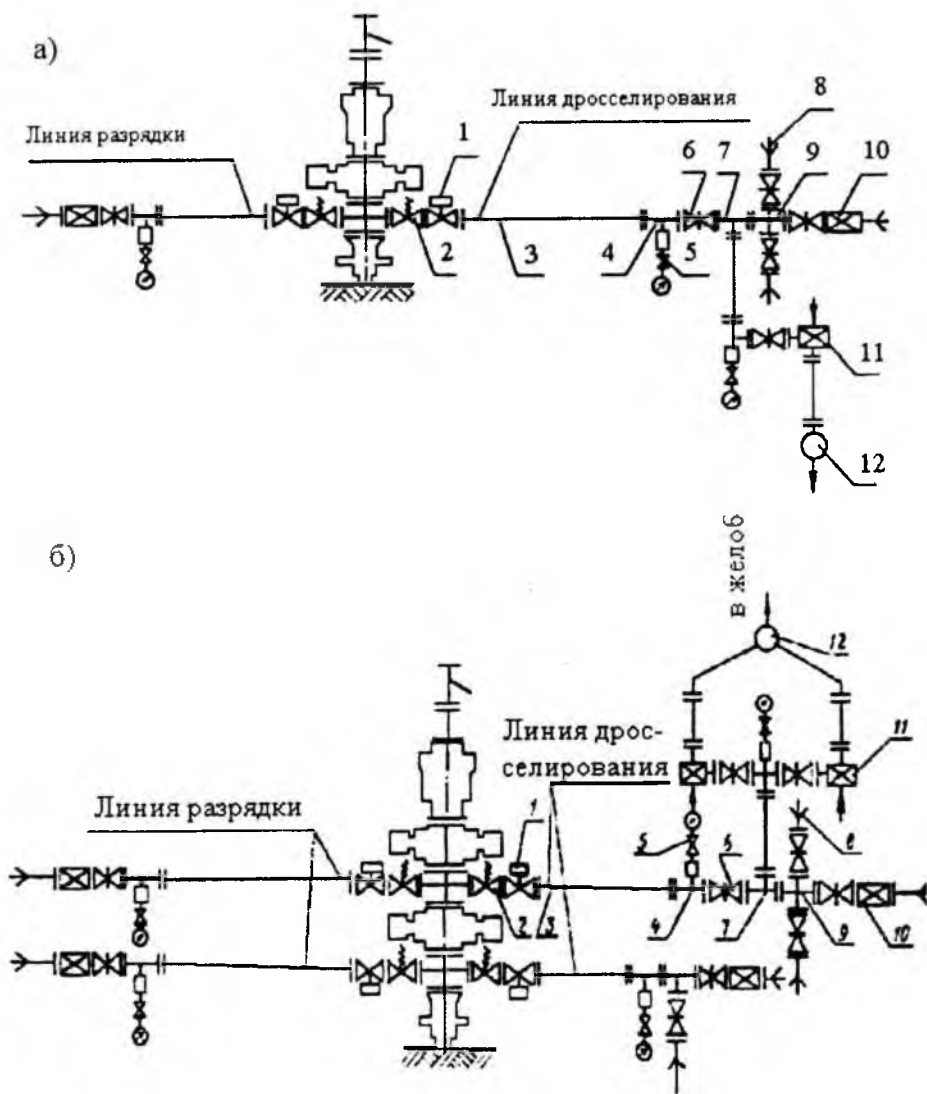
Манифольды чаще всего изготавливают по одной из следующих четырех схем: с двумя выкидами и тремя штуцерами; с двумя выкидами и четырьмя штуцерами; с тремя выкидами и четырьмя штуцерами; с четырьмя выкидами и шестью штуцерами.

Манифольд работает непродолжительное время (исключая бурение сверхглубоких скважин), в связи с чем, на стадии проектирования следует рассматривать только стадию его нормальной работы, когда отсутствуют признаки старения и износа оборудования. При правильно организованном профилактическом обслуживании такое допущение не внесет серьезных погрешностей в производимые расчеты.

На рис.4.4 приведены схемы манифольдов различной сложности. Усложнение манифольда влечет за собой не только увеличение числа выкидов и штуцеров, но и возрастание количества состояний, в которых может находиться система.

Для оценки надежности манифольдов последние представляются эквивалентными структурными схемами. Они являются условным графическим изображением элементов схемы и связей между ними. Элементы структурной схемы представляют собой запорные устройства (задвижки), соединяемые друг с другом последовательно или параллельно в зависимости от схемы функционирования. Эти схемы составляются по общим правилам теории надежности (рис.4.5). Одни и те же задвижки используются в нескольких технологических операциях и в аварийных ситуациях должны иметь повышенную надежность [7].

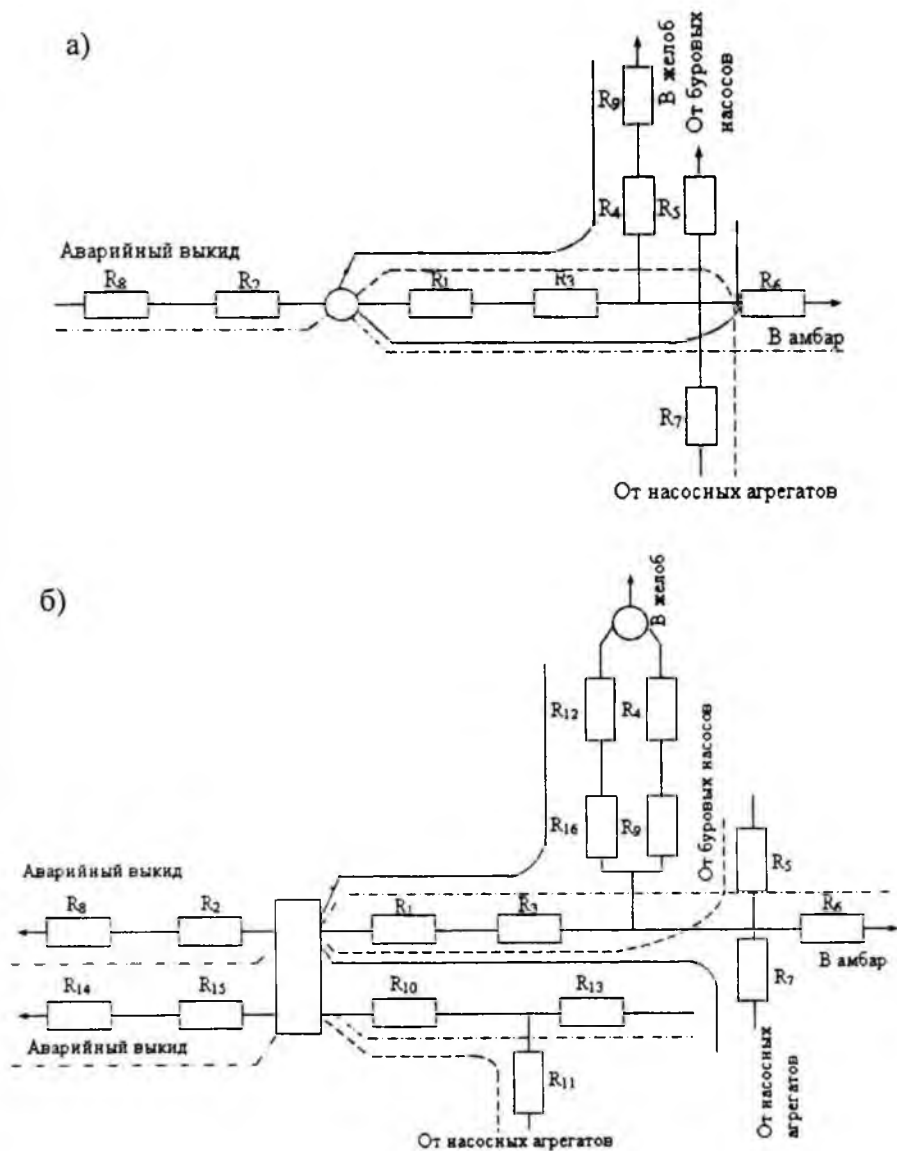
Схемы манифольдов с двумя выкидами и тремя штуцерами (а),
и с четырьмя выкидами, и шестью штуцерами (б)



1-гидроприводная задвижка; 2-устройство для открывания манифольда; 3-напорная труба; 4-фланец под манометр; 5-запорное устройство и разделитель; 6-задвижка с ручным управлением; 7-тройник; 8-быстроразъемное соединение; 9-крестовина; 10-быстрозаменяемый штуцер; 11-регулируемый штуцер; 12-отбойная камера.

Рис. 4.4.

Структурные схемы для расчета надежности манифольдов
представленных на рис. 4.4



—*— - циркуляция бурового раствора с созданием противодавления;
 — - задавка скважины буровыми насосами; --- - задавка скважины
 цементировочными агрегатами; - - - - выкид бурового раствора в амбар;
 - - - - - аварийная разрядка скважины

Рис. 4.5.

При работе на закрывание запорные устройства резервируются поэлементно, а при работе на открывание резервирование осуществляется установкой дополнительной струны. Это обстоятельство учитывается при составлении расчетных выражений для оценки надежности выполнения технологических операций.

Последовательное и параллельное с точки зрения надежности соединение элементов не всегда совпадает с физически последовательным или параллельным соединением. В том случае, когда запорное устройство работает на открывание, схема надежности совпадает с физической. В случае, когда задвижка работает на закрывание, схема надежности не совпадает с физической, т.е. расположенные последовательно запорные устройства в схеме надежности рассматриваются как параллельные и наоборот. Принимается, что все запорные устройства (задвижки) равнонадежны при выполнении одинаковых операций.

Структурная схема надежности манифольда составляется применительно к выполняемым им технологическим операциям. Основные технологические операции, выполняемые манифольдом: циркуляция бурового раствора в желобе с созданием противодавления; задавливание скважины буровыми насосами; задавливание скважины цементирующими агрегатами; выброс бурового раствора в амбар; аварийная разрядка скважины.

Как было выше отмечено, под отказом в срабатывании понимается невозможность выполнения манифольдом какой-либо технологической операции при возникновении необходимости в ее выполнении. В качестве показателей надежности запорных устройств манифольдов принимаются два основных параметра.

1. Готовность срабатывания $R_r(x)$, под которой понимается вероятность отсутствия отказа в срабатывании запорного устройства при нефте-, газопрооявлениях скважины (см. выражение (2.41)).

2. Среднее число срабатываний запорных устройств N_{cp} , представляющее собой математическое ожидание порядкового номера того нефте-, газопрооявления скважины, при котором наступает отказ запорного устройства манифольда, если при всех предыдущих оно срабатывало (см. выражение (2.42)).

Для удобства расчетов надежности задвижке присвоен определенный номер. Движение жидкости или газа на рис.4.5 показано стрелками в зависимости от выполняемой операции.

Расчет надежности функционирования манифольда производится пооперационно.

Введем следующие обозначения: $R_{\pi}(x)$ - готовность срабатывания i -й задвижки на открытие; $R'_{\pi}(x)$ - готовность срабатывания i -й задвижки на закрытие; q_i - вероятность отказа i -й задвижки при работе на открытие; q'_i - вероятность отказа i -й задвижки при работе на закрытие.

Вероятность успешного выполнения манифольдом любой из перечисленных выше технологических операций при отсутствии резервных струн $P_{\text{он}}$ выражается как произведение готовности срабатывания не имеющих резерва запорных устройств (задвижек) на открытие и на закрытие на вероятность того, что не откажет хотя бы одна из задвижек, имеющих резерв,

$$P_{\text{он}} = \prod^n R_i \cdot \prod^m R'_j \cdot \prod (1 - q_i'^2). \quad (4.20)$$

Коэффициенты n , m определяются количеством запорных устройств, которые должны безотказно работать для успешного выполнения технологической операции.

Тогда вероятность успешного выполнения технологических операций манифольдом, представленным на рис.4.4а, запишется в следующем виде: циркуляция бурового раствора в желобы

$$P_{\text{у п}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_9 \cdot R'_5 \cdot R'_6 \cdot R'_7 (1 - q'_2 \cdot q'_8); \quad (4.21)$$

задавка скважины буровыми насосами

$$P_{6 \text{ н}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_5 \cdot R'_4 \cdot R'_6 \cdot R'_7 (1 - q'_2 \cdot q'_8); \quad (4.22)$$

задавка скважины цементирующими агрегатами

$$P_{\text{у а}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_7 \cdot R'_4 \cdot R'_6 (1 - q'_2 \cdot q'_8);$$

разрядка скважины в амбар

$$P_{\text{р а}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_6 \cdot R_{10} \cdot R'_4 \cdot R'_5 \cdot R'_1 (1 - q'_2 \cdot q'_8); \quad (4.23)$$

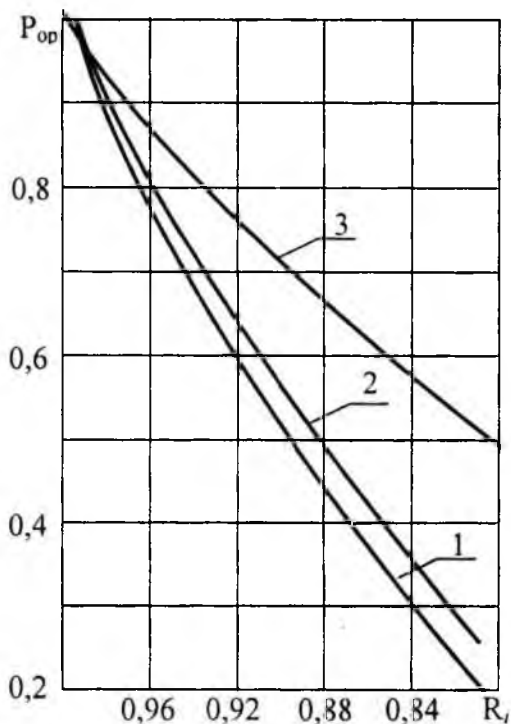
разрядка скважины через аварийный выкид

$$P_{\text{а в}} = R_2 \cdot R_8 \cdot R_{13} (1 - q'_1 \cdot q'_3). \quad (4.24)$$

Как видно из приведенных расчетных выражений, надежность отдельных технологических операций неодинакова и тем выше, чем меньше запорных устройств участвует при выполнении данной операции.

Для количественной оценки надежности манифольда построены кривые зависимости пооперационной надежности от готовности срабатывания отдельных запорных устройств при условии, что они равнонадежны. На рис.4.6. приведена такая зависимость для манифольда с двумя выкидами и тремя штуцерами.

Зависимость пооперационной надежности от готовности срабатывания отдельных запорных устройств



при: 1- циркуляции бурового раствора и разрядке скважины в амбар; 2-задавливании скважины буровыми насосами и цементировочными агрегатами; 3- разрядке скважины через аварийный выкид.

Рис. 4.6.

Кривые на рис.4.6 построены в предположении равенства готовности срабатывания запорных устройств на открывание и закрывание. Тем не менее, они достаточно наглядно иллюстрируют характер изменения надежности выполнения манифольдом технологических операций в зависимости от безотказности его элементов.

При расчете надежности манифольдов, имеющих резервные струны, вероятность выполнения операций вычисляется отдельно для верхней и нижней струн. Так как надежность струн является неодинаковой, из-за различного числа запорных устройств, установленных на этих струнах, результирующая вероятность успешного выполнения операции определяется с учетом надежности обеих струн.

Как следует из рис.4.4а резервирование струн манифольда дает эффект только при достаточно высокой единичной надежности запорных устройств.

Для получения более полной характеристики надежности исследуемого оборудования, отражающей все возможные его состояния, необходимо провести статистический анализ функционирования этого оборудования, который может быть произведен с помощью метода интенсивностей переходов - пооперационно, начиная с простейшей схемы манифольда (см. рис.4.4а), выполняющего технологическую операцию циркуляции бурового раствора в желобе. Циркуляция бурового раствора с созданием противодавления успешно осуществляется, если открыты запорные устройства (ЗУ) № 1, 3, 4, 9, закрыты № 5, 6, 7 и закрыто хотя бы одно из ЗУ № 2 и 8. Отказ на открывание любого из ЗУ № 1, 3, 4, 9, отказ на закрывание любого из ЗУ № 5, 6, 7 или одновременный отказ ЗУ № 2 и 8 приводит к невозможности выполнения данной технологической операции. При этом отказ задвижек № 2 и 8 неравнозначен. При обнаружении отказа задвижки № 8 она может быть заменена в процессе эксплуатации без нарушения технологического режима работы манифольда, после чего система возвращается в нормальное состояние. В случае отказа на закрывание задвижки № 2, последнюю невозможно заменить без нарушения технологического процесса.

Возможные состояния могут быть описаны следующим образом: все запорные устройства исправны, система полностью исправна и работоспособна; задвижка № 8 отказала, система работоспособна, потребуется замена отказавшей задвижки; задвижка № 2 отказала, система работоспособна, но работает без резерва на аварийном выкиде; отказ на открывание одной из задвижек № 1, 3, 4, 9 или отказ на закрывание одной из задвижек № 5, 6, 7; система неработоспособна, дальнейшее выполнение технологической операции возможно только после замены отказавшей задвижки.

Надежность манифольда наилучшим образом характеризуется готовностью срабатывания. А вероятность безотказной работы манифольда в течение времени t может быть вычислена согласно выражению

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{\infty} P_{нг}(i) P'_{з.у}, \quad (4.25)$$

где $P_{нг}(i)$ - вероятность того, что за время t произойдет i -е количество нефте-, газопроявлений скважины.

Выражение $\sum_{i=0}^{\infty} P_{н.г}(i)P_{з.у}^i$ представляет собой математическое

ожидание вероятности отсутствия отказа в срабатывании запорных устройств при возникновении i -го количества нефте-, газопроявлений скважины в течение времени t .

Если промежуток времени сравнительно невелик, то сумма двух первых членов ряда $\sum_{i=0}^{\infty} P_{н.г}(i)$ близка к единице, т.е.

$$P_{н.г}(0) + P_{н.г}(1) \rightarrow 1.$$

Принимая во внимание то обстоятельство, что при нормальном процессе бурения манифольд находится в режиме ожидания и начинает функционировать только при нефте-, газопроявлениях скважины и, следовательно, основным параметром, характеризующим надежность запорных устройств манифольда, является λ - интенсивность отказов, а вероятность $P_{з.у}$ близка к единице, можно пренебречь третьим и всеми последующими членами ряда

$\sum_{i=0}^{\infty} P_{н.г}(i)P_{з.у}^i$ и записать его в следующем виде:

$$P(t) \cong \exp(-\lambda t),$$

т.е. поток отказов запорных устройств манифольда можно считать пуассоновским с интенсивностью отказов, равной λ .

Манифольд противовыбросового оборудования является восстанавливаемой технической системой. Поскольку отказавшие запорные устройства на месте не ремонтируются, а заменяются новыми, то за время восстановления τ_v принимается время, необходимое для замены отказавшего оборудования.

Усложнение схемы манифольда приводит к возрастанию количества состояний, в которых может находиться система. Применительно к операции циркуляции бурового раствора эти состояния описываются следующим образом (см. рис.4.46):

- все запорные устройства исправны, система полностью исправна и работоспособна;
- отказала одна из задвижек № 4 и 9, система работоспособна, но работает без резерва;
- отказала задвижка № 2, система работоспособна, но работает без резерва на рабочей струне аварийного выкида;
- отказала задвижка № 11, система работоспособна, но работает без резерва на резервной струне аварийного выкида;

- отказала задвижка № 10, система работоспособна, но работает без резерва на линии сброса раствора в амбар;
- отказала задвижка № 8, система работоспособна, но требуется замена отказавшей задвижки;
- отказала задвижка № 14, система работоспособна, но требуется замена отказавшей задвижки;
- отказала одна из задвижек № 12 или 13, система работоспособна, но требуется замена отказавшей задвижки;
- отказ на открывание одной из задвижек № 1 и 3 или отказ одновременно задвижек № 4 и 9 или отказ на закрывание задвижек № 5, 6, 7, система не работоспособна, дальнейшее выполнение технологической операции возможно только после замены отказавшей задвижки.

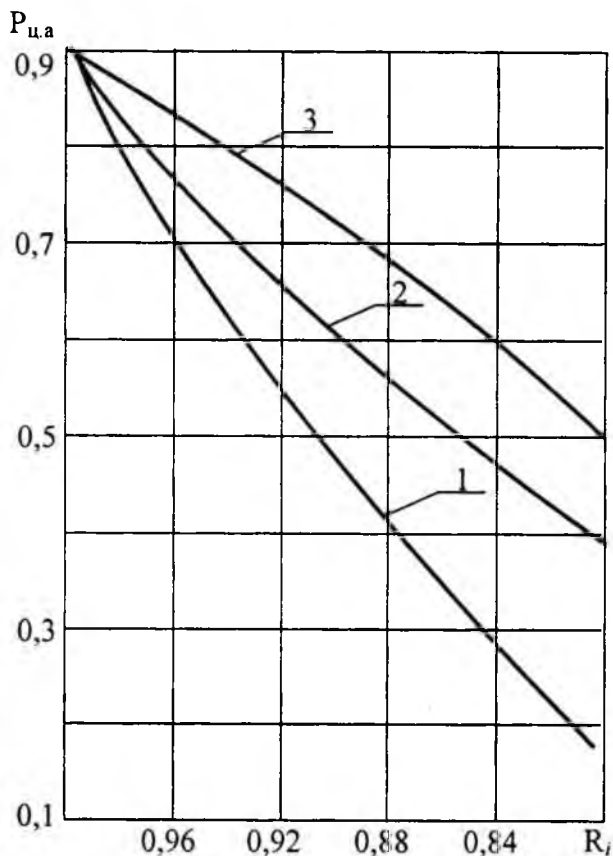
Слабым звеном наиболее сложного манифольда (рис.4.4б) являются главные задвижки № 1, 2, 10, 11. Создание резервных струн манифольда существенно повышает надежность схемы при работе задвижек на открывание, но не повышает надежности этих схем при работе задвижек на закрывание. Более того, увеличение числа резервных струн в манифольде приводит к росту вероятности пребывания системы в состоянии, когда на той или иной струне отсутствует резервирование задвижек на закрывание.

В связи с изложенным, в рассмотренных схемах представляется целесообразной установка дополнительных задвижек, осуществляющих резервирование на закрывание главных задвижек манифольда.

При расчете надежности манифольдов, имеющих резервные струны, вероятность выполнения операций вычисляется отдельно для верхней $P_{\text{цр}}^в$ и нижней $P_{\text{цр}}^н$ струн (табл.4.2). На рис.4.7 представлены кривые надежности верхней и нижней струн манифольда в отдельности и результирующая вероятность успешного выполнения операции по задавливанию скважины цементировочными агрегатами. Как видно, резервирование струн манифольда дает эффект только при достаточно высокой единичной надежности запорных устройств.

Изложенная методика расчета надежности манифольда позволяет оценить вероятность успешного выполнения различных технологических операций на стадиях проектирования и эксплуатации. Ввиду того, что в состав манифольдов входит большое количество запорных устройств, надежность последних оказывает существенное влияние на результирующую безотказность манифольдов.

Повышение пооперационной надежности манифольда резервированием



1- верхняя струна; 2- нижняя струна; 3- результирующая

Рис. 4.7.

Существующие схемы манифольда обеспечивают приемлемую надежность функционирования при единичной надежности запорного устройства не ниже 0,96. При надежности единичного запорного устройства ниже 0,96 поддержание необходимого уровня надежности манифольда в целом может быть достигнуто путем повышения степени резервирования участков технологической цепи.

Таблица 4.2.

Зависимости для оценки вероятности выполнения операций и
результатирующей надежности

Операции	Верхняя струна	Нижняя струна	Результатирующая
Циркуляция бурового раствора	$P'_{\text{цр}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R'_5 \cdot R'_6 \cdot R_7 \times$ $\times (1 - q_4 \cdot q_9) \cdot (1 - q'_2 \cdot q'_8) \times$ $\times (1 - q'_{11} \cdot q'_{14}) \cdot (1 - q'_{10} \cdot q'_{12})$		$P_{\text{рез}} = P_{\text{цр}}$
Задавка скважины буровыми насосами	$P'_{6\text{н}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_2 \cdot R'_4 \cdot R'_5 \cdot R'_6 \cdot R'_9 \times$ $\times (1 - q'_2 \cdot q'_8) \cdot (1 - q'_{11} \cdot q'_{14}) \times$ $\times (1 - q'_{10} \cdot q'_{12})$		$P_{\text{рез}} = P_{6\text{н}}$
Задавка скважины цементировочными агрегатами	$P_{\text{ца}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_5 \cdot R'_4 \cdot R'_6 \cdot R'_7 \cdot R'_9 \times$ $\times (1 - q'_2 \cdot q'_8) \cdot (1 - q'_{11} \cdot q'_{14})$	$P_{\text{ца}} = R_{11} \cdot R_{13} \cdot R'_{12} \times$ $\times (1 - q'_2 \cdot q'_8) \cdot (1 - q'_{11} \cdot q'_{14})$	$P_{\text{рез}} = 1 - (1 - P_{\text{ца}}^s) \cdot (1 - P_{\text{ца}}^n)$
Разрядка скважины в амбар	$P_{\text{па}} = R_1 \cdot R_3 \cdot R_6 \cdot R'_4 \cdot R'_5 \cdot R'_7 \cdot R'_9 \times$ $\times (1 - q'_2 \cdot q'_8) \cdot (1 - q'_{11} \cdot q'_{14})$	$P_{\text{па}} = R_{10} \cdot R_{12} \cdot R'_{13} \times$ $\times (1 - q'_2 \cdot q'_8) \cdot (1 - q'_{11} \cdot q'_{14})$	$P_{\text{рез}} = 1 - (1 - P_{\text{па}}^s) \cdot (1 - P_{\text{па}}^n)$
Аварийная разрядка скважины	$P_{\text{ар}} = R_2 \cdot R_8 \cdot (1 - q'_2 \cdot q'_3) \times$ $\times (1 - q'_{10} \cdot q'_{12})$	$P_{\text{ар}} = R_{11} \cdot R_{14} \times$ $\times (1 - q'_2 \cdot q'_3) \cdot (1 - q'_{10} \cdot q'_{12})$	$P_{\text{рез}} = 1 - (1 - P_{\text{ар}}^s) \cdot (1 - P_{\text{ар}}^n)$

5. Нормирование показателей надежности

Проблема повышения надежности промышленных изделий является не только технической, но и экономической. Поэтому затраты средств на повышение надежности изделий в большинстве случаев необходимо соизмерять с затратами на последующую их эксплуатацию.

Надежность является основным, решающим фактором, определяющим величину расходов при эксплуатации изделий. Чем выше надежность, тем ниже общие эксплуатационные расходы. С другой стороны для повышения надежности, как правило требуется увеличить затраты на проектирование и производство, на испытание и доводку изделий. Из сказанного следует, что повышать надежность изделий с экономической точки зрения целесообразно в большинстве случаев до некоторого уровня, при котором суммарные затраты на повышение надежности изделий и их эксплуатацию будут минимальными. Определение такого оптимального уровня надежности, связано с необходимостью введения норм показателей надежности изделий.

Под нормированием надежности понимают установление в нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации количественных и качественных требований к надежности. Нормы показателей надежности облегчают качественное и количественное сравнение основных видов нефтепромыслового оборудования между собой и с лучшими зарубежными образцами.

Статистический анализ результатов наблюдений за работой оборудования или результатов специальных испытаний на надежность позволяет выявить фактический уровень надежности рассматриваемых видов оборудования и его узлов. Сравнение же фактической надежности с заданной позволяет сделать обоснованные выводы о необходимости или целесообразности проведения дальнейших работ по повышению надежности основных видов нефтепромыслового оборудования. Нормы показателей надежности устанавливаются для каждого типа изделия в зависимости от технико-экономического анализа применительно к определенным условиям эксплуатации. Для некоторых типов изделий не исключено введение различных форм показателей надежности для различных вариантов использования этих изделий.

Нормирование надежности включает выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности; технико-экономическое

обоснование значений показателей надежности объекта и его составных частей; задание требований к точности и достоверности исходных данных; формирование критериев отказов, повреждений и предельных состояний; задание требований к методам контроля надежности на всех этапах жизненного цикла объекта [45].

В общем случае реализация мероприятий по повышению надежности изделий требует дополнительных как единовременных (приобретение оборудования, проведение строительно-монтажных работ, изготовление или приобретение инструмента, технологической оснастки, средств контроля и т.д.), так и текущих (расходы на материалы, заработная плата и др.) затрат. Таким образом, величина суммарных дополнительных затрат на повышение надежности изделий зависит от множества различных факторов, которые не всегда имеется возможность учесть. Однако общим для всех способов повышения надежности изделий в какой-то мере является тот факт, что с повышением надежности увеличивается стоимость изделия повышенной надежности. Поэтому, абстрагируясь от конкретных методов повышения надежности, можно применить единую математическую модель увеличения стоимости изделия повышенной надежности.

Дополнительные затраты при эксплуатации изделий, связанные с уровнем безотказности, как было выше отмечено, зависят от последствий отказов (см. табл.2.2). При этом для изделий, отказы которых могут привести к травмированию обслуживающего персонала, а также к загрязнению окружающей среды, допустимые значения показателей надежности должны быть достаточно высокими, и экономическая эффективность от повышения надежности в этом случае не является основным критерием оптимальности.

В качестве нормируемых показателей надежности могут быть использованы один или несколько показателей, значения которых регламентированы нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией на объект.

Для оценки безотказности изделий могут применяться, как отмечалось, такие количественные показатели, как вероятность безотказной работы $P(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$ и средняя наработка до отказа $\bar{T}_1$ или на отказ $\bar{T}$. Поскольку $P(t)$ и $\lambda(t)$ являются функциями времени, то каждому моменту времени будет соответствовать их конкретное значение. Например, увеличение $P(t)$ может произойти не в результате внедрения каких-либо мероприятий по повышению надежности, а в результате уменьшения времени ис-

пользования изделия. При таком подходе о нормах показателей $P_n(t)$ и $\lambda_n(t)$ можно говорить лишь для некоторого конкретного, заранее известного промежутка времени t_p , который устанавливается в зависимости от технологических особенностей эксплуатации изделия, принятой системы технического обслуживания, объема выполняемых изделием работ и других факторов. Поэтому наиболее целесообразно определять норму средней наработки до отказа $\bar{T}_{ин}$, а затем по известным зависимостям $P(t)$ и $\lambda(t)$ определять нормы этих показателей за любое время $t \leq t_p$.

Если известен физический процесс изнашивания или разрушения (что позволяет прогнозировать моменты наступления отказов) или в технической документации предусмотрено использование средств технической диагностики, позволяющей определять состояние изделия, то можно использовать показатель - назначенный ресурс.

Назначенный ресурс - это суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

При оценке степени увеличения стоимости оборудования за счет реализации мероприятий по повышению надежности необходимо выбрать некоторый исходный уровень, относительно которого будет производиться эта оценка. В качестве такого уровня можно выбрать существующий к моменту разработки оборудования уровень (базовый уровень надежности).

Принимая, что безотказность изделия в результате реализации мероприятий по повышению надежности увеличивается от уровня P_0 до P , можно предположить, что функция увеличения стоимости изделия повышенной безотказности $C(P_0, P)$ должна иметь следующие свойства [11]:

$C(P_0, P) > 0$, т.е. стоимость всегда положительна; $C(P_0, P)$ является не убывающей функцией; $C(P_0, 1) = \infty$, т.е. в реальных условиях проектирования и изготовления создать абсолютно безотказное изделие при конечных затратах невозможно; $C(P_0, P) = C_0$, где C_0 - стоимость проектирования и изготовления существующего изделия с базовым уровнем безотказности P_0 . Последнему условию удовлетворяет функция:

$$C(P_0, P) = C_0 \left(\frac{\bar{T}_1}{T_0} \right)^\varepsilon, \quad (5.1)$$

где T_0 - суммарная наработка до отказа N_0 изделий;

ε - коэффициент, характеризующий эффективность вложения средств для повышения надежности; $\varepsilon = 0 \dots \infty$.

Данная зависимость используется в качестве математической модели увеличения стоимости изделия повышенной безотказности.

При $\varepsilon = 0$ $C(P_0, P) = C_0$, что соответствует случаю, когда повышение безотказности изделия с уровня P_0 до P не требует дополнительных затрат. При $\varepsilon \rightarrow \infty$ $C(P_0, P) \rightarrow \infty$, что соответствует случаю, когда практически безотказность не может быть повышена с уровня P_0 до P при конечных затратах.

Значение коэффициента ε для каждого конкретного случая определяется путем статистической обработки данных о затратах на повышение безотказности аналогичных изделий и технико-экономического анализа.

5.1. Расчет нормированных показателей безотказности

Суммарные затраты Z на разработку, изготовление и эксплуатацию

$$Z = C_0 \left(\frac{\bar{T}_1}{T_0} \right)^\varepsilon + C_1 \frac{T_p}{\bar{T}_1}. \quad (5.2)$$

Для нахождения оптимального (нормированного) значения наработки до отказа $T_{\text{опт}}$, при котором суммарные затраты будут минимальными, продифференцируем выражение (5.2) по $\bar{T}_1$ и производную приравняем нулю. После преобразований получим

$$T_{\text{н}} = \varepsilon + 1 \sqrt{\frac{C_1 T_0^\varepsilon T_p}{\varepsilon C_0}}. \quad (5.3)$$

Данное уравнение справедливо для любого закона распределения времени безотказной работы изделий.

Рассмотрим методику определения оптимальных показателей безотказности ($P_{\text{опт}}$, $\lambda_{\text{опт}}$) для наиболее часто встречающихся законов распределения времени безотказной работы бурового оборудования - усеченного нормального закона и закона Вейбулла.

При усеченном нормальном законе распределения времени безотказной работы для заданного промежутка времени T_p оптимальные значения P и λ найдутся из условий

$$T = T_{\text{опт}}; \quad (5.4)$$

$$s_1^2 = s_{1\text{опт}}^2, \quad (5.5)$$

где $s_1 = +\sqrt{D[\xi]}$ - статистическая оценка среднего квадратического отклонения наработки до отказа.

После внедрения мероприятий по повышению надежности изделий среднее квадратическое отклонение наработки до отказа будет иметь тенденцию к уменьшению, так как увеличивается однородность изделий по качественным показателям. Поэтому

$$s_1 = \delta s_{1\text{опт}}, \quad (5.6)$$

где δ - коэффициент, характеризующий рост однородности качественных показателей оборудования после внедрения мероприятий по повышению надежности; $\delta \leq 1$;

$s_{1\text{опт}}$ - среднее квадратическое отклонение наработки до отказа существующего (базового) оборудования.

Величина коэффициента δ зависит от дополнительных затрат на повышение надежности ΔC и может быть определена по результатам обработки статистических данных.

Математическое ожидание $M[\xi]$ и дисперсия $D[\xi]$ случайной величины, распределенной по усеченному нормальному закону, определяются из выражений [11]

$$M[\xi] = \sigma_0 [b_0 + \varphi_0(b_0)]; \quad (5.7)$$

$$D[\xi] = \sigma_0^2 [1 - b_0 \varphi_0(b_0) + \varphi_0^2(b_0)], \quad (5.8)$$

где $b_0 = \frac{a_0}{\sigma_0}$ - отношение параметров усеченного нормального закона распределения вероятностей;

$\varphi_0(b_0) = \frac{f_0(b_0)}{F_0(b_0)}$ - вспомогательная функция;

$F_0(b_0)$ и $f_0(b_0)$ - соответственно функция нормального распределения и функция плотности нормального распределения вероятностей центрированной и нормированной случайной величины.

Учитывая зависимость для определения коэффициента вариации $\nu = \frac{+\sqrt{D[\xi]}}{M[\xi]}$, а также выражения (5.4), (5.5) и (5.6), получим

$$\nu_{\text{опт}} = \frac{S_{1\text{опт}}}{T_{\text{опт}}} = \frac{\delta \nu_0}{\sqrt{\frac{C_1 T_p}{\varepsilon T_0 C_0}}} = \frac{\sqrt{1 - \varphi_0(b_0)[b_0 + \varphi_0(b_0)]}}{b_0 + \varphi_0(b_0)}, \quad (5.9)$$

где $\nu_0 = \frac{S_{1\text{опт}}}{T_{\text{опт}}}$ - коэффициент вариации наработки до отказа базового оборудования;

Для решения уравнения (5.9) определяется параметр b_0 [11], соответствующий оптимальным $T_{\text{опт}}$ и $S_{1\text{опт}}$. Далее с учетом выражения (5.7) получим

$$\frac{t - a_0}{\sigma_0} = \frac{t}{T} [b_0 + \varphi_0(b_0)] - b_0.$$

Подставляя это значение в зависимости $P(t)$ и $\lambda(t)$ (см. раздел 3.2) и учитывая условия (5.4) и (5.5) получим уравнения, определяющие оптимальные значения вероятности безотказной работы $P_{\text{опт}}$ и интенсивности отказов $\lambda_{\text{опт}}$ для усеченного нормального распределения:

$$P_{\text{опт}} = \frac{1 - F_0 \left\{ \frac{t}{T_{\text{опт}}} [b_0 + \varphi_0(b_0)] - b_0 \right\}}{F_0(b_0)}; \quad (5.10)$$

$$\lambda_{\text{опт}} = \frac{1}{T_{\text{опт}}} \cdot \frac{[b_0 + \varphi_0(b_0)] f_0 \left\{ \frac{t}{T_{\text{опт}}} [b_0 + \varphi_0(b_0)] - b_0 \right\}}{1 - F_0 \left\{ \frac{t}{T_{\text{опт}}} [b_0 + \varphi_0(b_0)] - b_0 \right\}}. \quad (5.11)$$

Аналогично можно получить расчетные формулы для определения $P_{\text{опт}}$ и $\lambda_{\text{опт}}$ в случае распределения Вейбулла при условии, $T = T_{\text{ср}}$.

Учитывая, что параметр распределения Вейбулла

$$a = \left[\frac{\Gamma\left(\frac{1}{m}\right)}{mT} \right]^m,$$

уравнения $P(t)$ и $\lambda(t)$ можно записать в виде

$$P_{\text{опт}} = \exp \left\{ - \left[\frac{\Gamma\left(\frac{1}{m}\right)}{m} \right]^m \left(\frac{\varepsilon T_0 C_0}{C_1 T_p} \right)^{\frac{m}{\varepsilon+1}} \left(\frac{t}{T_0} \right)^m \right\}; \quad (5.12)$$

$$\lambda_{\text{опт}} = \frac{m}{t} \left[\frac{\Gamma\left(\frac{1}{m}\right)}{m} \right]^m \left(\frac{\varepsilon T_0 C_0}{C_1 T_p} \right)^{\frac{m}{\varepsilon+1}} \left(\frac{t}{T_0} \right)^m. \quad (5.13)$$

При выводе уравнений (5.12) и (5.13) сделано предположение, что параметр распределения Вейбулла m после внедрения мероприятий по повышению надежности не изменяется, изменяется только средняя наработка до отказа.

Как известно, при $m=1$ распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное распределение. Учитывая это, для экспоненциального закона распределения формулы (5.12) и (5.13) можно легко преобразовать.

Полученные формулы позволяют определить оптимальные значения показателей безотказности, за исключением случаев, когда вследствие отказов оборудования возможны человеческие жертвы, травмирование обслуживающего персонала или масштабное загрязнение окружающей среды.

Расчет норм показателей безотказности нефтепромыслового оборудования для указанных законов распределения рекомендуется производить в следующей последовательности:

1. Выбирается существующий тип оборудования, который принимается в качестве базового.

2. По статистическим данным о затратах на проектирование, изготовление и эксплуатацию определяются средние значения стоимости проектирования и изготовления базового оборудования и стоимости устранения одного отказа.

3. В результате технико-экономического анализа или путем обработки статистических данных о затратах на повышение надежности базового оборудования оценивается эффективность вложения средств, для повышения надежности, а также рост однородности качественных показателей оборудования после внедрения мероприятий по повышению надежности.

4. По статистическим данным об отказах базового оборудования устанавливается закон распределения времени безотказной работы и определяются параметры распределения и средняя наработка до отказа.

5. В зависимости от технологических особенностей эксплуатации базового оборудования устанавливается значение периода t_p .

6. По известным значениям параметров, перечисленных в пунктах 2 ... 5, определяется оптимальная средняя наработка до отказа $\bar{T}_{ин}$ оборудования после повышения его надежности.

7. Для установленного закона распределения времени безотказной работы, по приведенным выше формулам, рассчитываются нормы показателей безотказности: вероятности безотказной работы P_n и интенсивности отказов λ_n за любое время $t \leq t_p$.

Контроль нормируемых показателей надежности должен включать:

- получение и математическую обработку исходных данных;
- принятие решения о соответствии или несоответствии изделий установленным требованиям;
- анализ причин и последствий отказов с целью разработки мероприятий по повышению надежности изделий.

5.2. Распределение норм надежности по элементам системы с преобладанием внезапных отказов

Для сложных технических систем задача обеспечения необходимого уровня надежности на стадии проектирования, как правило, решается путем структурного анализа конструкции изделия. При этом немаловажное значение имеет распределение нормируемых показателей надежности по отдельным деталям, сборочным единицам и подсистемам.

Особенно важным является распределение нормируемых показателей надежности для систем (подсистем) с деталями и сборочными единицами, имеющими низкие значения наработок до

отказа, с преобладанием отказов внезапного характера, которые могут привести к нарушению принятого технологического процесса и значительному материальному ущербу.

Распределение требований по надежности для различных элементов систем производится обычно на этапах эскизного и рабочего проектирования. Предварительно рассматриваемая система подразделяется на некоторое число подсистем (элементов), а для механических систем - на отдельные детали, сборочные единицы, агрегаты, механизмы и др. Например, несмотря на то, что гидравлическая часть насосов является восстанавливаемой в условиях эксплуатации подсистемой, основными показателями ее надежности являются показатели безотказности. Это связано с тем, что отказ данной подсистемы зачастую приводит к невыполнению предусмотренной задачи и значительным материальным затратам.

В практике, при распределении норм надежности чаще всего используется один из следующих методов [49]:

1. Метод равномерного распределения.
2. Метод пропорционального распределения.
3. Метод распределения требований по надежности с учетом уязвимости элементов.
4. Метод распределения требований по надежности с учетом важности подсистем.
5. Метод рационального распределения норм надежности.

Метод равномерного распределения применяется довольно редко, так как требует достижения одинаковой надежности элементов системы, причем без учета их важности и последствий отказов. Естественно для технических систем условие обеспечения равной безотказности деталей и сборочных единиц практически невыполнимо.

Метод пропорционального распределения используется в случаях, когда система состоит из последовательно соединенных подсистем и каждая из них содержит k_i элементов. В этом случае надежность i -ой подсистемы определяется из соотношения [49]:

$$P_i = \alpha_i \sqrt[k_i]{P^{TP}}, \quad (5.14)$$

где α_i - число «приведенных» элементов;

$$\alpha_i = \sum_{i=1}^n k_i / k_i ;$$

n - число подсистем, входящих в систему.

В данном случае трудности в основном связаны с установлением числа «приведенных» элементов. Если известны интенсивности отказов элементов λ_i , то α_i определяется

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_i k_{i,j} / \sum_{j=1}^m \lambda_i k_{i,j}. \quad (5.15)$$

Метод распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов (метод ARINC) целесообразно использовать в тех случаях, когда система состоит из последовательно соединенных подсистем, имеющих постоянную интенсивность отказов, и когда отказ любой составной части вызывает отказ системы. При использовании этого метода задача состоит в выборе таких уровней интенсивностей отказов элементов λ_i^{TP} , которые удовлетворяли бы неравенству

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^{TP} \leq \Lambda^{TP}, \quad (5.16)$$

где Λ^{TP} - требуемая интенсивность отказов системы.

Весовые множители ω_i для каждого элемента системы (с учетом $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$) задаются исходя из данных по интенсивностям отказов изделия-аналога или по результатам предварительных испытаний.

$$\omega_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.17)$$

Далее вычисляются требуемые интенсивности отказов элементов системы

$$\lambda_i^{TP} = \omega_i \Lambda^{TP}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.18)$$

При использовании данного метода предполагается [49], что система (подсистема) имеет постоянную интенсивность отказов и, что отказ любой составной части вызывает отказ системы, а заданная наработка элементов равна заданной наработке системы.

Значительный интерес представляет метод распределения требований по надежности с учетом важности подсистем (сборочных единиц). Метод основан на допущении о последовательном соединении подсистем, имеющих постоянную интенсивность отказов.

В данном случае исходят из значений показателя важности ω_i каждой подсистемы с учетом вероятности отказа системы при отказе i -ой подсистемы.

При распределении требований по надежности предполагается, что каждый элемент вносит одинаковый вклад в безотказную работу системы. Тогда требуемая надежность для каждой i -ой подсистемы определяется из соотношения [49]:

$$\lambda_i = \frac{N_i [-\ln P^{TP}(t)]}{N \omega_i t_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.19)$$

где N_i - число элементов в i -ой подсистеме;

$P^{TP}(t)$ - требуемая вероятность безотказности работы системы за время t ;

N - общее число элементов в системе;

t_i - требуемая продолжительность работы i -ой подсистемы за время работы системы.

Требуемая вероятность безотказной работы i -ой подсистемы за данное время определяется по выражению

$$P_i^{TP}(t) = 1 - \frac{1 - [P^{TP}(t)]^{N_i/N}}{\omega_i}. \quad (5.20)$$

Формула (5.20) дает лучшее приближение, если значение коэффициента важности ω_i рассматриваемой подсистемы близко к единице.

Последний из указанных - метод рационального распределения норм надежности, применяется не столько для обеспечения соответствия полученного при расчетах значения надежности требуемому уровню, сколько с целью наиболее рационального распределения дополнительных средств, необходимых для повышения надежности отдельных элементов.

5.3. Определение требуемого уровня безотказности сборочных единиц нефтепромыслового насоса

Рассмотренные выше методы распределения нормируемых показателей надежности основаны на допущениях о последовательном соединении подсистем, имеющих экспоненциальное распределение времени безотказной работы; причем, при условии, что отказ любого элемента приводит к отказу всей системы.

Этим предпосылкам отвечают, например, детали и сборочные единицы гидравлической части буровых и нефтепромысловых насосов, широко применяемых на многих операциях при бурении и эксплуатации нефтяных и газовых скважин.

Среди насосов высокого давления, достаточно отработанной конструкцией, является плунжерный нефтепромысловый насос Н5-160 с давлением нагнетания до 25 МПа. Он предназначен для нагнетания в скважины абразиво-содержащих и коррозионных сред: промывочно-продавочных жидкостей при соляно- и углекислотных обработках призабойной зоны пластов, промывках песчаных пробок, цементировании скважин и других операциях.

Многими авторами установлено, что характерной причиной отказов деталей гидравлической части насосов высокого давления, является потеря герметичности. В период нормальной работы пар трения на поверхности контактирующих деталей под воздействием абразивной прослойки образуются риски и царапины, что в дальнейшем приводит к возникновению щелей и неплотностей. Из-за значительного перепада давления происходит прорыв через образовавшиеся неплотности абразивной струи, вызывающей развитие гидроабразивной эрозии - вида изнашивания с высокой интенсивностью разрушения рабочих поверхностей деталей, приводящего в большинстве случаев к внезапным отказам. Особенно это характерно для клапанов насосов высокого давления.

Наибольшее применение, как в нефтепромысловых, так и в буровых насосах получили клапаны с конусной посадочной поверхностью, так как они более приспособлены для работы при высоких давлениях и при наличии механических примесей в перекачиваемой жидкости. Основной причиной их отказов является образование местного или кольцевого зазора между сопряженными коническими поверхностями затвора и седла клапана. По этой причине в момент закрытия клапана происходит защемление уплотнительных манжет на отдельных участках и их разрушение. Поэтому в большинстве случаев отказы клапанов насосов высокого давления обуславливаются в первую очередь износом и разрушением резиновых уплотнительных элементов.

Причины отказов и механизм изнашивания деталей пары плунжер-уплотнение аналогичны вышеуказанным. Однако из-за одностороннего действия плунжерных насосов в отдельных случаях удается предотвратить развитие гидроабразивной эрозии рабочей поверхности плунжера путем своевременной замены уплотнительных элементов.

Таким образом, в качестве объектов исследований принимаются сборочные единицы гидравлической части нефтепромыслового насоса Н5-160: клапаны и пары плунжер-уплотнение.

Анализ показывает, что на этапе проектирования, учитывая условия эксплуатации и преобладание внезапных отказов гидравлической части насосов высокого давления, эти допущения вполне правомерны. Наиболее приемлемыми из рассмотренных методов являются методы распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов и важности подсистем. Гидравлическая часть нефтепромыслового насоса Н5-160, принятая в качестве объекта исследования, состоит из трех групп последовательно соединенных сборочных единиц (табл.5.1) клапанов, плунжеров и уплотнений плунжеров.

Таблица 5.1.

Исходные данные для распределения требований по безотказности по сборочным единицам насоса Н5-160

№ сбороч- ной еди- ницы	Наименование сборочной единицы	Коэффициент важности (ω_i)	Число сборочных единиц в системе (N_i)	Общее число сбо- рочных единиц в системе (N)
1	Клапан	1,0	6	12
2	Плунжер	0,95	3	
3	Уплотнение плунжера	0,95	3	

Произведем подбор элементов с требуемой интенсивностью отказов λ_i^{TP} на основе метода распределения норм надежности с учетом относительной уязвимости элементов.

По результатам обработки статистических данных получены следующие оценки интенсивностей отказов: клапанов – $\lambda_1 = 0,005$ 1/ч, плунжеров $\lambda_2 = 0,003$ 1/ч и узлов уплотнений плунжеров – $\lambda_3 = 0,004$ 1/ч.

Вычислим по формуле (5.17) коэффициенты уязвимости:

$$\omega_1 = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = 0,42;$$

$$\omega_2 = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = 0,25;$$

$$\omega_3 = \lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = 0,33.$$

По данным работы [16] 91,2% всех отказов насосов приходится на долю деталей гидравлической части. Причем, средняя наработка на отказ насосных установок составляет 24,3 ч (при среднем квадратическом отклонении 8 ч). Исходя из этого примем, что для рассматриваемой системы, состоящей из трех видов сборочных единиц, требуется обеспечить вероятность безотказной работы системы $P^{TP}=0,95$ в течение времени непрерывной работы $t=25$ ч.

Учитывая преобладание внезапных отказов гидравлической части нефтепромыслового насоса, принимаем экспоненциальный закон распределения наработок и находим требуемую интенсивность отказов Λ^{TP} .

$$P(t) = \exp(-\Lambda^{TP} \cdot t) = 0,95,$$

откуда
$$\Lambda^{TP} = -\frac{\ln P(t)}{t} = -\frac{\ln 0,95}{25} = 0,00213 \text{ 1/ч.}$$

Далее по формуле (5.18) определяем требуемые интенсивности отказов сборочных единиц

$$\lambda_1^{TP} = \omega_1 \Lambda^{TP} = 0,000895 \text{ 1/ч;}$$

$$\lambda_2^{TP} = \omega_2 \Lambda^{TP} = 0,000533 \text{ 1/ч;}$$

$$\lambda_3^{TP} = \omega_3 \Lambda^{TP} = 0,000704 \text{ 1/ч.}$$

Соответственно определяем требуемые значения вероятности безотказной работы сборочных единиц:

$$P_1(t) = \exp(-0,000895 \cdot 25) = 0,9782;$$

$$P_2(t) = \exp(-0,000533 \cdot 25) = 0,9871;$$

$$P_3(t) = \exp(-0,000704 \cdot 25) = 0,9822.$$

Учитывая соответствие структурной схемы гидравлической части насоса последовательному соединению, а также принимая допущение о независимости отказов рассматриваемых сборочных единиц, произведем проверку обеспечения требуемой безотказности гидравлической части насоса,

$$P^{TP}(t) = \prod_{i=1}^3 P_i^{TP}(t) = 0,9782 \cdot 0,9871 \cdot 0,9822 = 0,95.$$

Как видно, требуемая вероятность безотказной работы $P^{TP}(t) = 0,95$ за время $t=25$ ч обеспечивается.

Произведем подбор элементов с требуемой безотказностью P^{TP} по методу распределения норм надежности с учетом важности сборочных единиц.

По данным работы [15] наибольшую вероятность отказов имеют клапаны насоса Н5-160 ($q(t)=0,10$). Далее следуют плунжер и его многоманжетное уплотнение ($q(t)=0,05$). С учетом этого принимаем: для клапанов коэффициент важности $\omega_1 = 1,0$ и для пары плунжер-уплотнение, $\omega_2 = \omega_3 = 0,95$.

Результаты определения интенсивности отказов сборочных единиц λ_i по формуле (5.19) и требуемой вероятности безотказной работы сборочных единиц $P_i^{TP}(t)$ по формуле (5.20) сведены в табл.5.2.

Таблица 5.2.

Результаты определения требуемого уровня безотказности сборочных единиц насоса Н5-160

№ сборочной единицы	Отношения N_i / N	Интенсивности отказов сборочных единиц (λ_i), 1/ч	Требуемые вероятности безотказной работы (P_i^{TP})
1	6/12	$10,66 \cdot 10^4$	0,9782
2	3/12	$5,61 \cdot 10^4$	0,9884
3	3/12	$5,61 \cdot 10^4$	0,9884

Произведем проверку обеспечения требуемой безотказности гидравлической части насоса

$$\prod_{i=1}^3 P_i^{TP}(t) = 0,9782 \cdot 0,9884 \cdot 0,9884 = 0,9556.$$

Полученный результат указывает, что требуемый уровень безотказности гидравлической части насоса ($P_i^{TP}(t) = 0,95$) обеспечивается.

Таким образом, при распределении норм надежности по элементам технической системы могут успешно применяться методы, учитывающие относительную уязвимость или важность рассматриваемых сборочных единиц. Первый метод предпочтительней при заданных интенсивностях отказов деталей и сборочных единиц. Второй метод применим при установленных значениях вероятности безотказной работы элементов за определенное время эксплуатации.

5.4. Вероятность выполнения монтажных работ в заданное время

Для отдельных видов, производимых в эксплуатации работ, таких как монтаж нефтепромыслового оборудования, наряду с качеством их выполнения важным является своевременное их завершение, т.е. нормирование по времени завершения работ.

Как было выше отмечено, к показателям монтажепригодности относится вероятность выполнения монтажных работ в заданное время - вероятность того, что время монтажа объекта не превысит заданное значение.

В свою очередь, вероятность выполнения монтажных работ в заданное время может определяться двумя вероятностями:

- вероятностью безотказного монтажа оборудования на объекте применения;
- вероятностью безошибочной работы исполнителей при монтаже оборудования.

Вероятность безотказного монтажа оборудования определяется как вероятность монтажа без возникновения технологических неполадок, требующих выполнения за установленный промежуток времени дополнительных операций, не предусмотренных технологией монтажа.

Вероятность безошибочной работы исполнителей определяется вероятностью выполнения за требуемый промежуток времени заданного объема работ без технологических ошибок.

Вероятность выполнения монтажных работ в течение интервала времени Δt может быть определена из следующих соображений [18]:

а) если оборудование при монтаже нормально собирается с вероятностью $P_{ог}(t_1, \Delta t)$, исполнитель не совершил ошибок с вероятностью $P_m(t_1, \Delta t)$ или совершил ошибку с вероятностью $[1 - P_m(t_1, \Delta t)]$, но ошибка была компенсирована с вероятностью β . Тогда вероятность безотказного функционирования системы "человек - монтируемое оборудование" определяется следующим образом:

$$P_1(t_1, \Delta t) = P_{ог}(t_1, \Delta t) \{P_m(t_1, \Delta t) + [1 - P_m(t_1, \Delta t)] \beta\}; \quad (5.21)$$

б) если исполнитель не совершил ошибок с вероятностью $P_m(t_1, \Delta t)$, оборудование нормально собирается при монтаже с веро-

ятностью $P_{06}(t_1, \Delta t)$ или не собирается с вероятностью $[1 - P_M(t_1, \Delta t)]$, но с вероятностью $P_Y(t_1, \Delta t, \gamma)$ неисправность была устранена.

Тогда

$$P_2(t_1, \Delta t) = P_M(t_1, \Delta t) \{ P_{06}(t_1, \Delta t) + [1 - P_{06}(t_1, \Delta t)] P_Y(t_1, \Delta t, \gamma) \}, \quad (5.22)$$

где $P_M(t_1, \Delta t)$ - вероятность безошибочной работы исполнителя в интервале времени Δt ;

$P_{06}(t_1, \Delta t)$ - вероятность безотказной сборки оборудования при монтаже на объекте применения в течение времени Δt ;

$P_Y(t_1, \Delta t, \gamma)$ - условная вероятность безотказной сборки оборудования с компенсацией последствий отказов при условии, если в момент γ произошел отказ ($t_1 < \gamma < t_1 + \Delta t$), и он был устранен.

Допустим, что в момент времени t_1 система «человек - монтируемое оборудование» была надежна. Вероятность того, что в момент $t_1 + \Delta t$ система окажется безотказной, определится как сумма вероятностей следующих четырех событий:

а) оборудование при монтаже нормально собирается и исполнитель не совершил ошибки

$$P_{06}(t_1, \Delta t) \cdot P_M(t_1, \Delta t); \quad (5.23)$$

б) оборудование при монтаже нормально собирается, исполнитель совершил ошибку, но устранил ее с вероятностью β

$$P_{06}(t_1, \Delta t) \cdot [1 - P_M(t_1, \Delta t)] \beta; \quad (5.24)$$

в) исполнитель не совершил ошибки, оборудование при монтаже не собирается, но благодаря принятым мерам, недочеты были устранены

$$P_M(t_1, \Delta t) [1 - P_{06}(t_1, \Delta t)] \cdot P_Y(t_1, \Delta t, \gamma); \quad (5.25)$$

г) исполнитель совершил ошибку при монтаже, но ее исправил, оборудование не собирается, но с помощью принятых мер, недочеты были устранены.

$$[1 - P_M(t_1, \Delta t)] \cdot \beta \cdot [1 - P_{06}(t_1, \Delta t)] \cdot P_Y(t_1, \Delta t, \gamma). \quad (5.26)$$

Тогда вероятность безотказного функционирования системы «человек - монтируемое оборудование» с компенсацией ошибок исполнителей при монтаже и недочетов при сборке оборудования определится по следующему выражению:

$$\begin{aligned}
 P_3(t_1, \Delta t) = & P_{об}(t_1, \Delta t) \cdot P_m(t_1, \Delta t) + P_{об}(t_1, \Delta t) \cdot [1 - P_m(t_1, \Delta t)] \cdot \beta + \\
 & + P_m(t_1, \Delta t) \cdot [1 - P_{об}(t_1, \Delta t)] \cdot P_y(t_1, \Delta t, \gamma) + \\
 & + [1 - P_m(t_1, \Delta t)] \cdot \beta \cdot [1 - P_{об}(t_1, \Delta t)] \cdot P_y(t_1, \Delta t, \gamma). \quad (5.27)
 \end{aligned}$$

При монтаже машин и оборудования на объектах применения большое значение имеет своевременное выполнение отдельных этапов работы. На рис. 5.1 изображена зависимость кумулятивной монтажной работы от времени. На координатной плоскости по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат - объем выполненных монтажных работ с нарастающим итогом.

Зависимость кумулятивной монтажной работы от времени

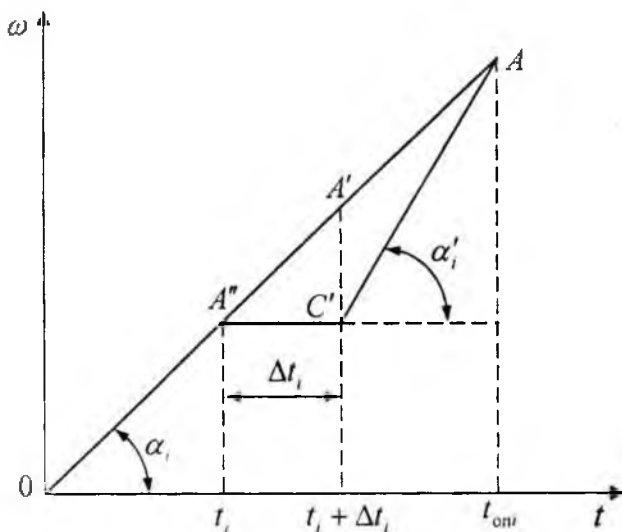


Рис. 5.1.

Если монтажные работы выполняются при нормальных условиях, они в зависимости от времени могут быть изображены прямой линией. Тангенс угла, образованного между положительным направлением оси абсцисс и линией OA, будет отражать интенсивность выполнения i -го этапа монтажных работ

$$J_i = \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\omega_i}{t_{опi}}, \quad (5.28)$$

где ω_i - объем i -го этапа монтажных работ;

$t_{опi}$ - оперативное время i -го этапа.

Допустим, что в момент t_i возникает неисправность оборудования, для устранения которой исполнитель затрачивает время Δt_i . Невыполненный объем монтажных работ за этот промежуток времени составит

$$\Delta \omega_i = \Delta t_i \operatorname{tg} \alpha_i = \Delta t_i \frac{\omega_i}{t_{\text{оп}i}}. \quad (5.29)$$

Для обеспечения выполнения задания за оперативное время необходимо увеличить интенсивность выполнения монтажных работ не менее, чем на J'_i

$$J'_i = \frac{\omega_i - \operatorname{tg} \alpha_i t_i}{t_{\text{оп}i} - t_i - \Delta t_i} = \omega_i \frac{t_{\text{оп}i} - t_i}{t_{\text{оп}i} (t_{\text{оп}i} - t_i - \Delta t_i)}. \quad (5.30)$$

Увеличение интенсивности выполнения монтажных работ, обеспечивающее надежность системы "человек - монтируемое оборудование", можно определить по следующему выражению:

$$\begin{aligned} \Delta J_i &= J'_i - J_i = \omega_i \frac{t_{\text{оп}i} - t_i}{t_{\text{оп}i} (t_{\text{оп}i} - t_i - \Delta t_i)} - \frac{\omega_i}{t_{\text{оп}i}} = \\ &= \frac{\omega_i}{t_{\text{оп}i}} \left(\frac{t_{\text{оп}i} - t_i}{t_{\text{оп}i} - t_i - \Delta t_i} - 1 \right) = \frac{\omega_i}{t_{\text{оп}i}} \cdot \frac{\Delta t_i}{t_{\text{оп}i} - t_i - \Delta t_i}. \end{aligned} \quad (5.31)$$

Увеличение интенсивности выполнения монтажных работ может быть достигнуто за счет увеличения числа исполнителей или сокращения продолжительности рабочих дней.

Своевременность выполнения монтажных работ в определенной степени зависит от психо-физиологических особенностей исполнителей, а также от их натренированности в монтаже данного оборудования. Поэтому функция распределения времени выполнения монтажных работ может быть определена по следующему выражению:

$$F(t) = P(T_m < t),$$

где T_m - время выполнения монтажных работ исполнителем, случайно выбранным из множества лиц данной специальности;

t - заданное время выполнения монтажных работ.

Плотность вероятности распределения времени выполнения монтажных работ определится по следующему выражению:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}.$$

Вопрос о своевременном выполнении монтажных работ неразрывно связан с адаптацией человека к определенным условиям труда. В трудовой деятельности человека существует период вработываемости, втягиваемости, в течение которого производительность труда увеличивается до определенного для данной личности уровня. Тем не менее, происходит колебание производительности труда относительно среднего значения.

Различные исполнители обладают различной производительностью труда. Распределение производительности труда может быть аппроксимировано нормальным распределением. Однако возможные его значения ограничены снизу и сверху. Поэтому на практике распределение труда рассматривается как усеченное нормальное распределение с плотностью вероятности

$$f(b) = c \cdot f(b) = \frac{c}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(b - m_b)^2}{2\sigma_b^2} \right],$$

где b - производительность труда;

m_b - математическое ожидание производительности труда;

σ_b - среднее квадратическое отклонение производительности труда;

c - нормирующий множитель, который определяется из следующего выражения

$$c = \frac{1}{\int_{b_1}^{b_2} f(b) db};$$

$b_1; b_2$ - ограничение производительности труда соответственно снизу и сверху.

Для исследования характера распределения производительности труда усеченное нормальное распределение видоизменено и принято альфа-распределением, плотность вероятности которого имеет вид

$$f(t) = \frac{c \cdot \beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right)^2 \right],$$

где α, β - параметры альфа-распределения;

$$\alpha = \frac{m_b}{\sigma_b}; \quad \beta = \frac{\omega}{\sigma_b}.$$

α называется коэффициентом однородности производительности труда исполнителей и определяется как обратное значение ее коэффициента вариации. β называется относительным объемом работы.

В ряде случаев альфа-распределение производительности труда можно записать как

$$f(t) = \frac{\theta \cdot \alpha}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{\theta}{t} - 1 \right)^2 \right],$$

где θ - характеристическое время выполнения работ;

$$\theta = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\omega}{m_b}.$$

Параметры альфа-распределения определяются экспериментально по статистическим данным о времени выполнения работ.

Коэффициент однородности производительности труда исполнителей может характеризовать состояние организации трудовых процессов при выполнении монтажных работ, состояние работ по обучению рациональным приемам монтажа, внедрение способов повышения производительности труда и т.д. Все указанные мероприятия призваны способствовать увеличению производительности труда и уменьшению разброса ее отдельных значений, т.е. должны обеспечить увеличение значения параметра α .

Оценка своевременности выполнения монтажных работ может быть осуществлена для различных систем:

- параллельная система независимых работ;
- последовательная система независимых работ;
- система работ, выполняемых различными исполнителями на одном рабочем месте.

Для параллельной системы монтажных работ функция своевременности определится:

- 1) по первому исполнителю, когда работа считается законченной, если ее выполнил хотя бы один из монтажников

$$R_1(t) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - F_j(t)], \quad (5.32)$$

где $F_j(t)$ - функция своевременности j -го элемента монтажных работ;

k - число параллельных работ в системе;

- 2) по последнему исполнителю, когда работа считается законченной, если ее выполняют все параллельно работающие исполнители:

$$R_2(t) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - F_j(t)]. \quad (5.33)$$

Для последовательной системы независимых работ общее время выполнения системы монтажных работ определится как сумма времени выполнения отдельных работ, т.е.

$$T_{\text{об}} = \sum_{j=1}^k T_j. \quad (5.34)$$

Сложность математических преобразований альфа-распределения не позволяет определять общий закон распределения времени завершения монтажной работы по распределениям времени выполнения ее отдельных элементов. Этот вопрос может быть исследован статистически, методом имитационных экспериментов.

Если монтаж оборудования состоит из значительного числа независимых работ, тогда закон распределения времени выполнения систем работ может быть принят нормальным с математическим ожиданием и дисперсией, равными сумме соответствующих параметров продолжительности отдельных работ. В этом случае функция своевременности определится из следующего выражения:

$$R_3(t) = 0,5 + \Phi(x),$$

где $x = \frac{t - m_{t_0}}{\sigma_{t_0}};$

m_{t_0}, σ_{t_0} - математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение продолжительности отдельных работ;

$\Phi(x)$ - нормированная функция Лапласа.

Для системы работ, выполняемых различными исполнителями на одном рабочем месте, плотность вероятности времени выполнения монтажных работ может быть определена из интегрального уравнения Вольтерра:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau, \quad (5.35)$$

где $\omega(\tau)$ - параметр потока завершения операций (смены исполнителей);

$f(t)$ - плотность вероятности распределения времени завершения монтажных работ.

6. Обеспечение ремонтной технологичности нефтепромыслового оборудования

Известно, что одним из важных показателей, характеризующих качество изделия машиностроения, является технологичность его конструкции.

Технологичность конструкции изделия представляет собой совокупность его свойств, определяющих приспособленность к достижению оптимальных затрат ресурсов при производстве и эксплуатации для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Основными причинами необходимости повышенного внимания к данной проблеме являются: применение все более сложных конструкций изделий, требующее пересмотра существующего подхода к организации технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) оборудования, а также развития ремонтных баз; превышение нередко затрат труда и средств на проведение ТО и Р оборудования, за время эксплуатации до предельного состояния, в несколько раз по сравнению с затратами на его изготовление.

При отработке конструкции на технологичность необходимо обеспечить требования, предъявляемые к ней не только в производстве, но и в эксплуатации, ремонте и монтаже у потребителя.

С этой целью применяется количественная оценка технологичности, основанная на системе показателей, включающей базовые показатели технологичности, устанавливаемые в техническом задании на проектирование изделия, показатели технологичности, достигнутые при разработке конструкции, и уровень технологичности как отношение достигнутых показателей к базовым.

Ремонтная технологичность (РТ) - это совокупность свойств конструкции объекта, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при капитальном и агрегатно-узловом видах ремонта. Технологичность при текущем ремонте относится к сфере эксплуатационной технологичности вместе с технологичностью при техническом обслуживании, поскольку учитывается, что текущий ремонт не приводит к изъятию объекта из сферы эксплуатации.

Требования к РТ конструкции зависят от вида объекта, его функциональных свойств, эксплуатационных условий, уровня безотказности и долговечности составляющих элементов, условий выполнения ремонтов и др. С учетом этих факторов определяется перечень необходимых ремонтных операций, к которым должна

быть приспособлена конструкция. Затем ведется отработка на РТ составных частей, для которых задаются требования, исходя из требований к изделию в целом. Целесообразной является отработка РТ на стадии проектирования, поскольку только тогда существует возможность эффективного управления РТ.

Сокращение времени на бурение и подземные ремонты скважин обусловлено не только совершенствованием технологии и интенсификации труда, но главным образом эффективностью, качеством и своевременным восстановлением применяемого оборудования.

Практическая нерешенность некоторых вопросов, связанных с техническим обслуживанием нефтепромыслового оборудования, вызывает необходимость уделения надлежащего внимания к его ремонтпригодности. Важной задачей улучшения ремонтных свойств технического объекта является обеспечение ремонтной технологичности конструкции - главный аспект ремонтпригодности.

РТ является функцией конструктивных, производственных и эксплуатационных факторов. К конструктивным относятся: контролепригодность, доступность, легкосъемность, блочность, взаимозаменяемость, восстанавливаемость, технологическая сложность, простотность, монтажепригодность, эргономичность. Производственные факторы определяются совершенством технологии и организации производства, а эксплуатационные - условиями, в которых используется объект, в том числе организацией и технологией ремонта.

РТ выражается через систему количественных показателей, из которых основными являются продолжительность, трудоемкость и стоимость ремонта данного вида.

Эксплуатационная технологичность (ЭТ) - это совокупность свойств конструкции изделия, характеризующих ее приспособленность к выполнению всех видов работ по ТО и Р с использованием наиболее экономичных технологических процессов.

В условиях эксплуатации осуществляются плановые текущие ремонты «по состоянию» - при обнаружении повреждений и отказов в процессе проведения контрольных технических осмотров и ТО, а также неплановые ремонты - для ликвидации последствий отдельных, в основном внезапных отказов. От степени отработанности конструкции сборочных единиц и агрегатов зависят трудоемкость регламентных работ и качество их выполнения, а следовательно, и продолжительность простоев оборудования в ТО и Р, номенклатура и расход материалов и запасных частей.

Рассматривая отдельные аспекты РТ и ЭТ, необходимо учитывать их тесную взаимосвязь в условиях эксплуатации. И РТ и ЭТ характеризуют приспособленность конструкции к выполнению определенных операций и зависят от уровня безотказности и ресурса деталей, сборочных единиц и агрегатов, удобства доступа к ним и других конструктивных, производственных и эксплуатационных факторов.

Эксплуатационная и ремонтная технологичности дополняют друг друга и определяются не только конструкцией изделия, но и организацией его ремонта. Таким образом, РТ в упрощении характеризует приспособленность конструкции объекта к выполнению определенных операций.

Поэтому обеспечение необходимого качества функционирования технических объектов требует комплексного решения многих вопросов, и в том числе обеспечения РТ и ЭТ.

Наряду с эксплуатационной и ремонтной технологичностью, характеризующими приспособленность конструкции изделия к выполнению определенных операций технического обслуживания и ремонта оборудования, важное значение имеет и монтажная технологичность.

Монтажная технологичность (МТ) - это совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при монтаже для заданных показателей качества, объема и условий выполнения работ.

Монтажная технологичность в основном определяется приспособленностью конструкции изделия к выполнению предэксплуатационного технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ в процессе монтажа объекта. В отличие от РТ и ЭТ монтажная технологичность имеет свои особенности. В процессе однократного стационарного монтажа машин и агрегатов производятся необходимые ТО и устранение повреждений, в основном возникающих при транспортировании оборудования на точку монтажа. Однако, для многих видов нефтепромыслового оборудования характерны также производимые в условиях эксплуатации разборки и демонтажи после завершения предусмотренных работ и повторные сборки и монтажи на новом месте эксплуатации.

Периодический цикл: сборка и монтаж, эксплуатация оборудования в течение определенного времени, разборка и демонтаж, транспортирование машин и агрегатов на новое место эксплуатации, оказывает существенное влияние на характер функционирования, и

в том числе на монтажную технологичность и требуемый уровень надежности нефтепромыслового оборудования.

На рис.6.1 представлена классификация и структура требований к технологичности конструкций технических объектов. Как видно, наиболее обширная структура требований имеет место по монтажной технологичности при периодических повторных демонтажно-монтажных работах. Однако, по важности обеспечения и ремонтная, и эксплуатационная технологичность по затратам, частоте и трудоемкости выполнения технического обслуживания, устранению отказов путем текущих и агрегатно-узловых ремонтов, не уступают монтажной технологичности.

6.1. Оценка уровня ремонтной технологичности

Ремонтная технологичность (РТ) оценивается совокупностью конструктивных, производственных и ряда эксплуатационных факторов. Конструктивные факторы приведены на рис.6.1. Производственные факторы определяются совершенством технологии и организации производства, а эксплуатационные - условиями, в которых используется объект, в том числе организацией и технологией текущего ремонта.

6.1.1. Методика комплексной оценки уровня ремонтной технологичности

Отработка конструкции на РТ должна проводиться с учетом основных требований, предъявляемых к конструкции оборудования:

- возможностью проведения агрегатно-узлового ремонта в условиях эксплуатации с использованием стандартного инструмента и стандартных ремонтных операций (в основном путем замен);
- обеспечением высокой безотказности элементов, для которых отсутствует возможность частых профилактических осмотров;
- возможностью выполнения ремонтов во время технологических простоев;
- обеспечением преимущественно хорошего доступа к быстроизнашивающимся деталям, без излишней разборки других частей оборудования.

Классификация и структура технологичности конструкций технических объектов

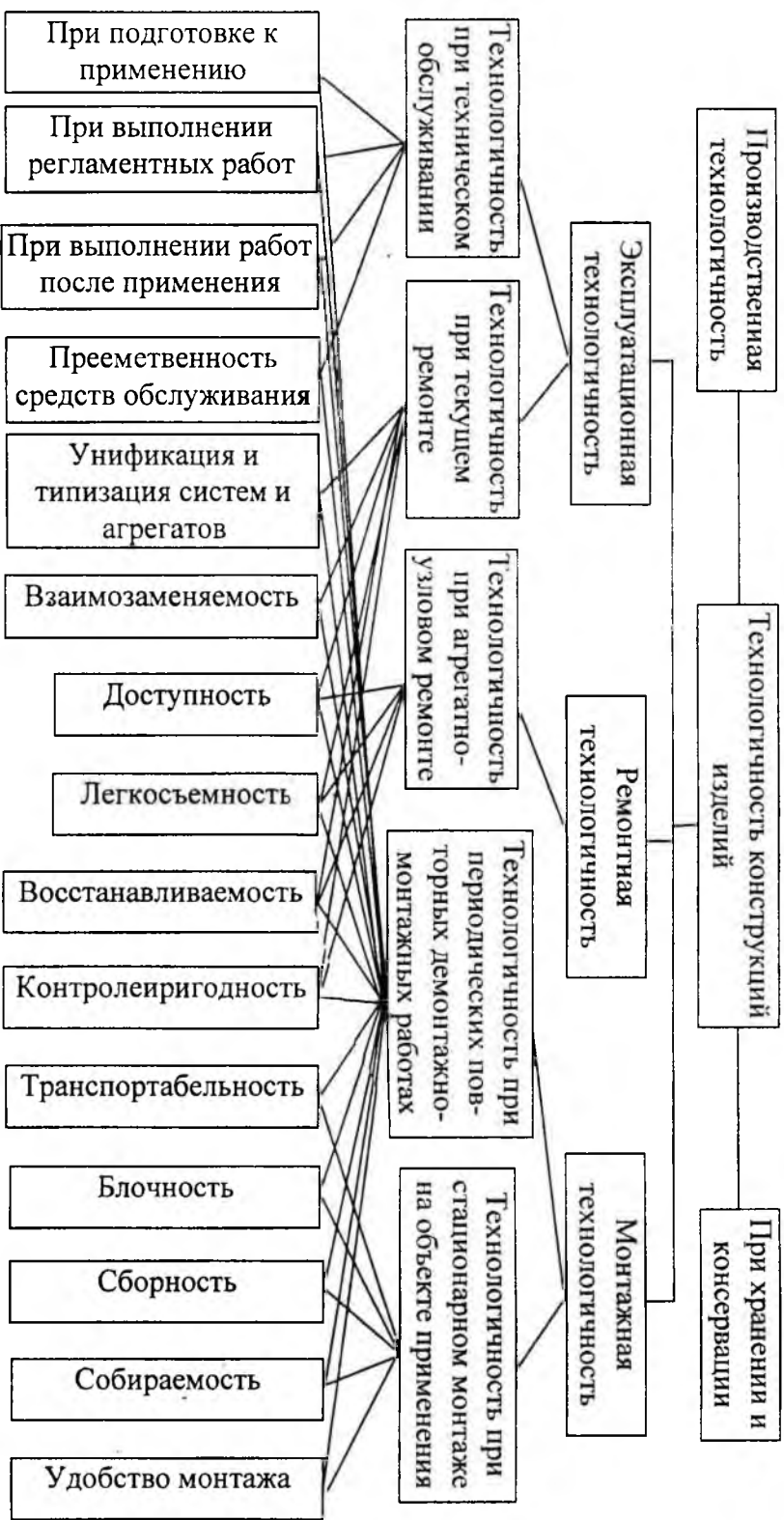


рис 6 1

Оценка уровня РТ объекта производится с использованием положений теории графов, структурного анализа, а также коэффициентов доступности и помех.

Оценка РТ состоит в следующем [17]:

- если в сборочной единице имеется N_1 деталей и при необходимости замены отказавшей детали a_j требуется предварительно снять детали с номерами $a_k, a_l, \dots, a_m$, то тогда операцию эту можно представить в виде:

$$a_j(a_k, a_l, \dots, a_m). \quad (6.1)$$

Запись (6.1) выражает доступность детали a_j при ее замене. Число элементов в скобках указывает на число предварительно снятых деталей при замене детали a_j . Сумма всех снятых деталей:

$$1a_j + (1a_k + 1a_l + \dots + 1a_m) = X^{(1)}.$$

Формулу оценки коэффициента доступности детали можно представить в виде:

$$K_{a_j} = 1 - \frac{X_j^{(1)} - 1}{X_j^{(1)}} = \frac{1}{X_j^{(1)}}; \quad (6.2)$$

$$0 < K_{a_j} < 1.$$

Для абсолютно доступных деталей $K_{a_j} = 1$, для труднодоступных (базовых) $K_{a_j} = \frac{1}{N_1}$. Для детали неразъемного соединения принимают $K_{a_j} = 0$.

Оценка РТ узла по критерию полной разборки, посредством информации о доступности всех деталей, последовательно записывается в виде:

$$\begin{aligned} & a_1(a_2, a_3, \dots, a_j); \\ & a_2(a_1, a_3, \dots, a_l); \\ & \dots\dots\dots \\ & a_{N_1-1}(a_l, a_j, \dots, a_k); \\ & a_{N_1}(a_l, a_m, \dots, a_n). \end{aligned} \quad (6.3)$$

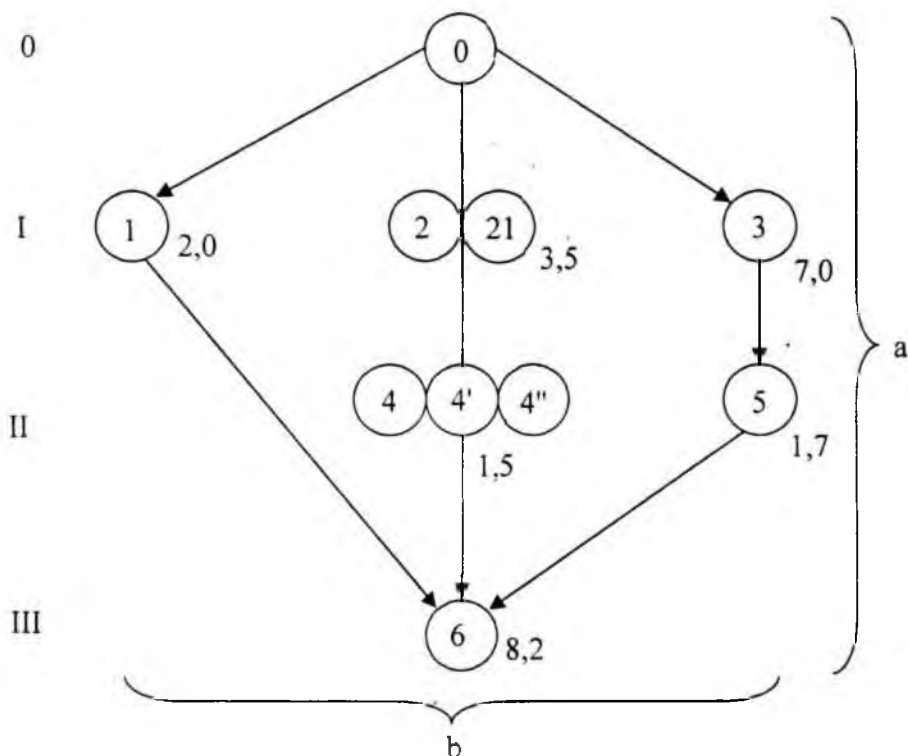
Запись (6.3) формируется в квадратную матрицу $N_1 \times N_1$ (см. ниже) так, чтобы номера деталей соответствовали бы номерам столбцов [17]. Элемент матрицы, принадлежащий i -й строке и j -му столбцу матрицы, будет равен единице, если из вершины i к вер-

шине j имеется непосредственный путь, и равен нулю, если непосредственного пути нет.

Из представленного графа (рис.6.2) можно извлечь следующую информацию:

- порядок расположения и связи между деталями и узлами;
- общее время выполнения разборочных (сборочных) работ;
- общее количество снимаемых деталей и узлов с целью открытия доступа к отказавшей детали;
- количество последовательно снимаемых (устанавливаемых) деталей и узлов;
- количество параллельно снимаемых (устанавливаемых) деталей и узлов;

Граф доступа



a - глубина поля доступа;
 b - ширина поля доступа.

Рис. 6.2.

За вес вершины графа $\mu(x_i)$ принято количество узлов и деталей, связанных с данной вершиной и снимаемых совместно. Итак, вес вершин 1,3,5,6 равен единице, вес вершины 2 - двум, вес вершины 4 - трем (см.рис.6.2).

Расстояние между вершинами графа $d(x_0, x_i)$ определяется кратчайшим путем между вершинами и выражается целыми, положительными числами. Ребро, связывающее две вершины, обозначает путь равный единице. Итак, для вершин 1,2,3 расстояние равно единице, для вершин 4,5 - двум, для вершины 6 - трем.

Число занятых ячеек в каждой строке $X_j^{(1)}$ характеризует доступность детали с номером a_j . Число занятых ячеек в каждом столбце $Y_j^{(1)}$ определяет число возможных случаев попутных съёмов детали a_j при замене других деталей.

Чем больше $Y_j^{(1)}$, тем большему числу деталей создаются помехи при их замене. Эту характеристику РТ определяют коэффициентом помех:

$$K_{nj} = \frac{Y_j^{(1)} - 1}{Y_j^{(1)}} = 1 - \frac{1}{Y_j^{(1)}}; \quad (6.4)$$

$$0 \leq K_{nj} < 1.$$

Для деталей, не создающих помех при замене других деталей $K_{nj} = 0$, для деталей, создающих максимальное неудобство

$$K_{nj} = 1 - \frac{1}{N_1}.$$

Общий массив квадратной матрицы, используемый с целью определения рангов сборочных единиц, определяется:

$$M_1 = \sum_{j=a_1}^{N_1} X_j^{(1)} = \sum_{j=a_1}^{N_1} Y_j^{(1)}. \quad (6.5)$$

Получить качественную оценку уровня РТ технического объекта позволяет метод, основанный на применении теории графов [50].

Метод состоит в изучении и анализе взаимного расположения и связей элементов объекта. Запись информации производится в форме графа доступа. Характеристики РТ конструкции оцениваются через облегченность доступа к узлам и деталям, что особенно важно

для объектов с невозстанавливаемыми деталями, которые в случае отказа следует заменить.

Комплекс разборочных работ представляют в виде ориентированного графа, с корневой вершиной (обозначенной нулем), которая означает начало выполнения работ. Вершины графа означают окончание работ, т.е. снимаемые детали, а ориентированные ребра (дуги) характеризуют последовательность выполнения разборочных операций, т.е. связи между деталями (рис.6.2). Цифры под вершинами отображают время снятия данной детали. Римскими цифрами обозначены уровни доступа. Первый уровень доступа обозначает, что доступ к детали открыт. Величины "а" и "b" характеризуют соответственно глубину и ширину поля доступа (см.рис.6.2).

Качественная оценка совершенства конструкции с точки зрения ее РТ производится по критерию приспособленности объекта к быстрой разборке (сборке), а следовательно, и к быстрому восстановлению работоспособного состояния. Оценка выражается в форме функции доступа, представляемой в следующем виде:

$$\Delta\varphi = \varphi_{d(x_0x_i)} - \varphi_{\mu(x_i)}; \quad (6.6)$$

$$\varphi_{d(x_0x_i)} = d^2(x_0x_i)F[d(x_0x_i)] - \{d(x_0x_i)F[d(x_0x_i)]\}^2; \quad (6.7)$$

$$\varphi_{\mu(x_i)} = \mu^2(x_i)F[\mu(x_i)] - \{\mu(x_i)F[\mu(x_i)]\}^2, \quad (6.8)$$

где $\varphi_{d(x_0x_i)}$ - суммарная характеристика расстояния между вершинами графа доступа;

$\varphi_{\mu(x_i)}$ - суммарная характеристика веса графа доступа;

$F[d(x_0x_i)]$ - количество вершин с равным расстоянием;

$F[\mu(x_i)]$ - количество вершин с равным весом.

Для оценки удобства доступа необходимо построить графы доступа, определить количество вершин с различными весом и расстояниями, а затем по формулам (6.6), (6.7), (6.8) вычислить функцию доступа.

Проще и удобнее определение функции доступа по методу, когда в качестве функции доступа принимается квадрат расстояний между векторами $[\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)]$ и $[d(x_0x_1), d(x_0x_2), \dots, d(x_0x_n)]$, который записывается в виде:

$$\Delta\varphi' = \sum_{i=1}^n \{F[\mu(x_i)] - F[d(x_0x_i)]\}^2. \quad (6.9)$$

Исследования показали согласованность $\Delta\varphi$ и $\Delta\varphi'$, причем последний характеризуется большей простотой вычисления и эконо-

мит время расчетов. На основании полученных по графу доступа результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- чем больше ребер сходится в одной вершине (чем больше полустепень захода вершины), тем более затруднен доступ к элементу, обозначенному этой вершиной;
- чем больше ребер исходит из вершины (чем больше полустепень исхода вершины), тем лучше доступ к расположенным на следующем уровне элементам, к которым ведут исходящие ребра;
- чем меньше глубина доступа, тем лучше доступ к элементу;
- чем больше вершин с большим весом, тем совершеннее конструкция;
- чем меньше глубина и ширина поля доступа, тем совершеннее конструкция.

При рассмотрении графов доступа необходимо учесть, что чем ближе значение функции доступа приближается к нулю, тем лучше доступ к элементу, для которого она определялась. Особое внимание следует уделить случаям, когда для доступа к данному элементу требуется почти полная или полная разборка всего объекта или же предварительное снятие многих элементов с помощью специальной оснастки (например, грузоподъемных средств). Такие решения свидетельствуют о несовершенстве конструкции.

О низком уровне доступа свидетельствует большое количество последовательно соединенных элементов, особенно с малым весом, что на изображении графа сразу бросается в глаза. Они же больше всего влияют на увеличение времени разборочных работ. Параллельно и одновременно снимаемые элементы не имеют какой-либо закономерной связи со временем их снятия, хотя параллельно снимаемые элементы могут влиять на уровень доступа как положительно, так и отрицательно.

Несмотря на свою простоту и наглядность, структурный анализ не выделяет всех особенностей конструкции проектируемого объекта. Структурные схемы не отображают последовательности операций технологии сборки и разборки, не дают существенной для уровня РТ информации о параллельно, последовательно и одновременно снимаемых деталях, ориентировочных затратах времени доступа к выбранному элементу и других характеристиках конструкции, имеющих непосредственное отношение к РТ.

При построении графов доступа по-разному решается проблема крепежных элементов. В некоторых случаях крепежные детали целиком включаются в граф, в иных - ими пренебрегают. Первый случай вызван стремлением возможно точно отобразить структуру

доступа, что однако при большом количестве крепежа приводит к чрезвычайно громоздким графам доступа и отнимает много времени на их построение. Предпосылки ко второму подходу опираются на соображение, что в среднем на один уровень доступа приходится примерно одинаковое количество крепежных элементов и поэтому не стоит усложнять картину графа. В этом случае на графе представляются только нестандартные крепежные элементы (требующие специального инструмента), но в расчетах показателей не учитывается количество стандартного крепежа. В графах не отображаются стопорения, соединения с натягом и другие факторы, мало влияющие на РТ конструкции.

Имеются указания о том, что корпусные элементы должны иметь максимально возможную вероятность обеспечения ресурса, а сам ресурс должен иметь значение, перекрывающее полный ресурс узла до списания. Руководствуясь этой предпосылкой, можно было бы исключить корпусные детали из графов доступа. Однако практика показывает, что расположение и компоновка корпусных деталей существенно влияют на уровень РТ конструкции. Поэтому в графах доступа следует их учитывать.

Перед началом решения задачи оценки уровня РТ, необходимо четко определить цель исследований и связанную с ней глубину и точность оценки. Существенно, на какой стадии разработки объекта производится оценка, или применяется она для существующих уже изделий. Очевидно, что глубина и точность оценок в таких случаях ожидается неодинаковой.

Необходимо отметить, что выявление уровня РТ конструкции производится также известными методами экспертных оценок, которые однако, не строятся по стандартным критериям, характеризуются немалой погрешностью и не всегда отвечают требованиям объективности оценки.

Разработанная методика представляет собой новый подход к оценке РТ, охватывающий качественную и количественную стороны вопроса. Методика основана на положениях теории графов и регрессионного анализа. В ней используются некоторые свойства ориентированных графов (орграфов), математический аппарат для описания этих свойств и известные методы корреляционно-регрессионного анализа [32].

На первом этапе строится граф доступа исследуемого объекта и на его базе по обоснованным критериям анализируется взаимное положение и связи узлов и деталей. Связи отображаются орграфами, а результатом их исследований является однозначный пока-

затель для качественной оценки степени совершенства конструкции (КОССК).

Второй этап заключается в дополнении качественной оценки РТ количественными характеристиками, получаемыми на основании технической документации путем корреляционно - регрессионного анализа.

Методику следует в основном применять для разрабатываемых конструкций, поскольку характеристики надежности (в их числе и РТ) закладываются в объект именно на стадии проектирования и их определение даже самым совершенным образом для существующего уже объекта практически ничего не меняет.

Предложенная методика основывается на принципах теории с использованием графа доступа, поскольку РТ главным образом обусловлена доступом к сборочным единицам и деталям.

В методике выделены следующие этапы:

- определение исходных данных для оценки РТ нефтепромыслового оборудования;
- построение графа доступа исследуемой конструкции;
- извлечение из графа доступа необходимой для расчетов информации;
- качественная оценка степени совершенства конструкции;
- количественная оценка РТ конструкции.

6.1.2. Исходные данные для оценки ремонтной технологичности

На этапе проектирования исходным материалом для определения показателей РТ являются:

- а) чертежи изделия, сборочных единиц, деталей и их спецификации;
- б) технология сборки и разборки с отмеченными в ней особенностями, присущими нефтепромысловому оборудованию;
- в) руководства по эксплуатации, ремонту и обслуживанию оборудования;
- г) каталоги запасных частей;
- д) нормативные документы для определения затрат времени, труда и средств на операции, из которых состоят работы при техническом обслуживании и ремонтах оборудования;
- е) характеристики и требования к надежности объекта - средний ресурс, среднее время безотказной работы, коэффициенты готовности и технического использования и др.;

ж) в некоторых случаях данные по пунктам а) - е) для изделий аналогов исследуемой конструкции;

з) данные об эксплуатационных факторах оборудования и его аналогов.

В случае исследования существующих конструкций нефтепромыслового оборудования для оценки необходимо использовать дополнительно статистические данные по эксплуатации или испытаниям оборудования с целью определения влияния внешних факторов на характеристики РТ. К ним относятся как сведения об условиях эксплуатации, так и время безотказной работы, число отказов, время восстановления и т.п.

Граф доступа, используемый для качественной оценки степени совершенства конструкции (КОССК), должен соответствовать следующим условиям:

1. Условия, определяющие существование графа доступа в виде ориентированного дерева распыла или древовидного орграфа с корневой вершиной:

1.1. конечное число элементов конструкции, а тем самым и вершин графа - n ;

1.2. конечное число операций при разборке (сборке), отраженных дугами графа - m ;

1.3. ориентация всех дуг графа в одном направлении - от корневой вершины вниз;

1.4. отсутствие дуг, исходящих из корневой вершины на какой-либо уровень доступа, кроме первого;

1.5. отсутствие параллельных дуг, т.е. вершины, находящиеся на одном уровне, не соединяются друг с другом;

1.6. планарность графа;

1.7. помеченность всех вершин графа;

1.8. связность графа, т.е. в нем нет изолированных вершин.

2. Граф доступа строится на базе чертежей объекта и данных о технологии его разборки (сборки), т.е. количество вариантов графов для данной конструкции ограничено ее функциональными и конструктивными свойствами.

3. Граф доступа отражает только необходимые операции при разборке (сборке) объекта. Таким образом, для одного и того же объекта можно построить различные графы доступа (с различным количеством дуг и вершин) в зависимости от конкретного случая и цели, для которой применяется граф.

4. Следствием, вытекающим из пункта 3, является пренебрежение весом вершин графа (см. [50]). Технологические элементы,

которые состоят из деталей или же являются неразъемными, могут подлежать разборке или нет в зависимости от конкретной ремонтной ситуации, отображаются в графе вершинами. В случае необходимости их дальнейшей разборки, ее операции можно легко представить, расширяя граф доступа построением дополнительных дуг и вершин. Таким образом, понятие веса вершины в данном случае теряет свой смысл и все вершины графа должны характеризоваться одинаковым весом, равным единице.

5. Основной информацией, которую требуется извлечь из графа доступа, является выявление способа перехода с высшего уровня доступа на низший. Поэтому:

5.1. при исследовании графа доступа рассматриваются только полустепени исхода;

5.2. полустепени захода графа не подлежат рассмотрению, поскольку они содержат только информацию о том, что переход на низший уровень доступа совершился. В них не отражена информация, каким образом это произошло - например, с какого уровня доступа совершился переход на данный уровень. Такая информация существенна для исследования операций разборки и ее отсутствие лишает смысла весь граф доступа;

5.3. кроме вышеизложенных аргументов целесообразно воспользоваться свойством ориентированного графа, для которого справедливо равенство:

$$\sum_{i=1}^n d_+(x_i) = \sum_{i=1}^n d_-(x_i) = m,$$

где x_i - i -ая вершина графа;

$d_+(x_i)$ - полустепень исхода i -й вершины;

$d_-(x_i)$ - полустепень захода i -й вершины;

n - число вершин графа;

m - число дуг графа.

Таким образом, исходя уже из математических соображений, при таком подходе избегают повторения определения зеркального отображения тех же параметров графа доступа и перегрузки системы оценки ненужной информацией.

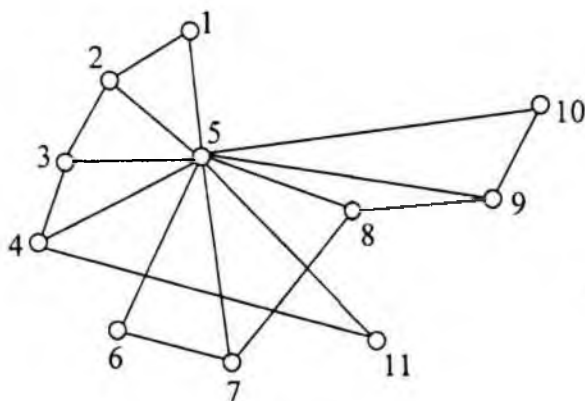
Форма, вид и объем графа доступа зависят от цели исследования конструкции. В случае, когда задача состоит в определении уровня РТ для конструкции в целом, граф отображает все ее элементы. Если возникает потребность оценки РТ не целой конструкции, а отдельных ее элементов, то рассматриваемый элемент будет

отображен в графе на последнем уровне доступа. Оценка такого графа будет отображать уровень РТ конструкции по отношению к данному элементу.

В случаях, когда не требуется рассмотрение целой конструкции (при текущих ремонтах, техническом обслуживании), при отборе элементов для определения их свойств целесообразно руководствоваться следующими соображениями:

1. На основании принципов структурного анализа строят общую структуру машины в форме графа, в котором вершины обозначают сборочные единицы или детали, а ребра - связи между ними (рис.6.3). Построение такого графа дает возможность рассматривать исключительно структуру машины, независимо от специфики ее элементов и технологии разборки. Из графа можно извлечь информацию о значимости (ранге) элемента структуры.

Структурный граф машины



1-11- сборочные единицы.

Рис. 6.3.

Такая информация позволяет распределить сборочные единицы в порядке их структурной значимости, которая характеризуется числом ребер, связывающих данный элемент с другими. Чем больше связей соединяет рассматриваемый элемент с другими, тем более тяжелыми будут последствия его отказа и тем больше затрат потребуется на его разъединение и последующее восстановление соединения с другими элементами.

С целью определения ранга элемента строится квадратная матрица, отображающая структурный граф (см. ниже, рис. 6.14). Вершины графа нумеруют в произвольном порядке и этими же номерами обозначают строки и столбцы матрицы.

Матрица доминирования для определения рангов элементов имеет вид:

$$R = A + A^2,$$

где A - матрица непосредственных связей графа.

Ранг i -го элемента будет равен сумме членов i -й строки матрицы доминирования R .

Элементы, обладающие самыми высокими значениями рангов, подлежат изучению в порядке уменьшения их рангов, начиная с элемента с наивысшим значением ранга.

2. Целесообразно рассматривать характеристики элементов, находящихся на самом низком уровне доступа. Разборочно-сборочные работы для таких элементов связаны с предварительным снятием (и последующей установкой) максимального количества других элементов, не обязательно связанных непосредственным образом с отказавшим элементом. Случай такого отказа сопровождается наибольшими затратами на ремонт и практически ведет к полной переборке объекта, как при капитальном ремонте. Такие элементы принято называть основными, и они, как установлено, на начальных этапах проектирования наиболее существенно влияют на уровень РТ всего объекта.

3. На основании количественных показателей надежности (время восстановления и количество отказов) следует выделить слабые места конструкции аналогов в случае проектируемых объектов (или исследуемых изделий в случае существующих объектов), и для этих элементов рассматривать характеристики графа доступа.

Три приведенных случая, квалифицирующие элемент к рассмотрению его характеристик графа доступа, могут возникнуть одновременно. Например, элемент с высоким значением ранга может находиться на высоком уровне доступа. Или же элемент на низком уровне доступа может обладать низким рангом. Возможно и такое, что элемент на высоком уровне доступа и обладающий низким рангом, может характеризоваться малым значением вероятности безотказной работы или же затраты на его восстановление могут быть весьма большими.

Любой из подобных случаев отражается на требованиях к уровню РТ исследуемого объекта. Выявление описанных точек кон-

струкции до исследования графа доступа сразу же ориентирует направление поисков конструктивных решений, например, в сторону большого увеличения вероятности безотказной работы элемента путем применения другого материала, уменьшения времени восстановления за счет принципиально нового решения, элиминации слабых мест путем изменения конструктивного решения и т.п. Обнаружение на начальном этапе анализа конструкции предпосылок и методов для устранения ее "узких мест" намного сокращает затраты времени и труда на проектирование и поиски наиболее рациональных решений.

Из вышеизложенного следует, что уже предварительный анализ графа доступа вносит определенную ясность в картину свойств данного конструктивного решения.

Учитывая цель исследований, при классификации элементов графа достаточно одного из трех указанных признаков, чтобы граф доступа для данного элемента подлежал изучению. Очевидно, наибольшее влияние как на уровень РТ, так и на требования к ней будут производить элементы, обладающие всеми тремя признаками вместе.

Вопросы, связанные с выбором элементов графа доступа, упрощаются, если на этапе исследования конструкции возникает задача изучения графа доступа для заранее выбранного элемента. В таком случае граф доступа строится целенаправленно, и последней его вершиной, находящейся на самом низком уровне доступа, обозначается выбранный элемент. В практике проектирования такая ситуация встречается чаще всего.

Форма, вид и объем графа доступа зависят от цели исследования конструкции. Из графа доступа можно извлечь информацию о значимости (ранге) элемента структуры. Такая информация позволяет распределить сборочные единицы в порядке их структурной значимости, которая характеризуется числом ребер, связывающих данный элемент с другими [50].

Качественная оценка РТ путем исследования графа доступа проводится по нижеописанным критериям.

Первая характеристика графа доступа выражается нормированным критерием вершины, определяемым по формуле:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{ni}}{m}, \quad (6.10)$$

где i - номер вершины в графе доступа;

n - максимально возможное число уровня доступа для данного количества элементов; при этом n равно количеству элементов;

α_m - полустепень исхода i -й вершины;

m - число дуг графа.

Критерий этот характеризует легкость доступа к элементам, расположенным на данном уровне.

В техническом смысле, с увеличением критерия α_i доступ улучшается, и после снятия i -й технологической единицы, обозначенной вершиной графа доступа, доступ к нижележащим элементам улучшается или ухудшается прямо пропорционально значению α_i .

Критерий α_i отображает количество операций, связанных с одной вершиной, производимых на данном уровне доступа, по отношению к количеству всех операций при разборке.

Вторая характеристика графа доступа выражается нормированным критерием уровня операций - β_j , основанным на предположении, что чем больше уровней доступа, тем хуже доступ к самому низкому уровню и лежащим на нем элементам. Большое количество уровней доступа является нежелательным фактором конструктивных свойств технического объекта. Критерий β_j учитывает влияние количества уровней доступа на уровень РТ конструкции. Вычисляется β_j по формуле:

$$\beta_j = 1 - \left(\frac{j}{n} \right)^{\gamma}, \quad (6.11)$$

где j - номер уровня доступа (с учетом исходного, нулевого уровня),

$j \in < 0; n-1 >$;

γ - показатель степени, значение которого зависит от различных факторов.

Как видно, критерий этот уменьшается по мере возрастания числа уровней доступа.

В техническом смысле, операции, осуществляемые на более низких уровнях, меньше влияют на характеристику доступа. Чем больше операций производится на высших уровнях доступа, тем уровень РТ конструкции лучше.

С целью обеспечения устойчивого критерия, независимо от числа уровней доступа (которое может не достигать максимально

возможного), его значения постоянны для каждого уровня доступа. Несоблюдение этого условия приводит к искажению оценки уровня РТ конструкции.

В виде примера допустим, что конструкция состоит из пяти элементов. Максимально возможное число уровней доступа пять. Но граф конструкции состоит из трех уровней доступа, включая исходный уровень. Соблюдая условие, нулевому уровню присваивается значение критерия $\beta_0 = 1$, первому - $\beta_1 = 4/5$, второму - $\beta_2 = 3/5$, третьему - $\beta_3 = 2/5$ (рис.6.4).

Принцип присвоения критериев уровней

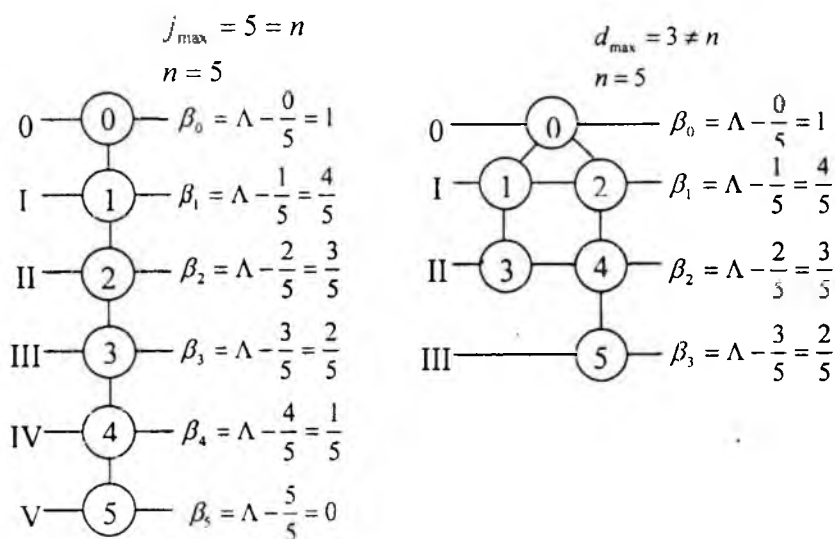


Рис.6.4.

Показатель степени γ , изменяющийся в пределах от 0 до $+\infty$, зависит от различных факторов, таких как:

- суммарная легкосъемность элементов по уровням доступа;
- условия эксплуатации и ремонта оборудования;
- степень сложности конструкции по уровням;
- степень повреждения элементов;
- квалификация персонала и т.п.

Совокупность факторов может быть отражена временем, затрачиваемым на доступ к данному уровню.

Область существования показателя степени γ представлена на рис.6.5. Показатель будет принимать значения меньше единицы

для конструкции, в которой сочетание факторов влечет за собой малые затраты времени доступа на начальных уровнях графа по отношению к затратам времени на конечных уровнях. Значения γ больше единицы присваиваются конструкции, в которой большие затраты времени приходятся на начальные уровни доступа. Для конструкции, в которой затраты времени доступа распределены по уровням равномерно или случайным образом - γ принимает значение единицы или близкое к единице.

Область существования показателя распределения
времени доступа по уровням

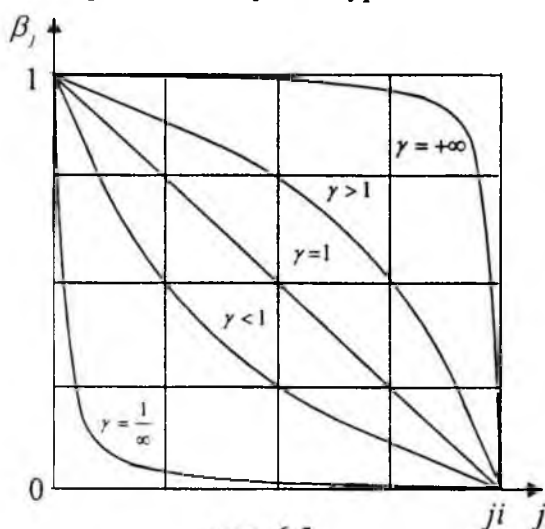


рис. 6.5.

Малые затраты времени на начальных уровнях доступа могут быть обусловлены, например, небольшой массой снимаемых элементов, небольшим их количеством, хорошей защищенностью от воздействия внешней среды, удобным к ним доступом. Примером таких элементов могут служить всякого рода кожухи, ограждения, легкоъемные крышки, заглушки и т.п. В конструкции, для которой принимается $\gamma < 1$, по мере перехода на следующие уровни доступа сложность разборки (а тем самым и затраты времени) увеличивается.

В конструкциях, для которых принимается $\gamma > 1$, большие затраты времени на начальных уровнях доступа могут быть связаны с большой суммарной массой снимаемых на данном уровне элементов, затруднениями, вызванными коррозией крепежных элемен-

тов, подверженных воздействию агрессивной среды, неудобством доступа с применением стандартного инструмента, тяжелыми климатическими условиями выполнения работ и др. В таких конструкциях, по мере перехода на последующие уровни доступа, разборка упрощается.

Значение показателя распределения времени доступа (РВД) по уровням

$$\sum_{j=0}^{j_{\max}-1} \left(1 - \frac{j}{n}\right) \frac{t_j}{t_{cp}} = \sum_{j=0}^{j_{\max}-1} \left[1 - \left(\frac{j}{n}\right)^r\right], \quad (6.12)$$

где t_j - суммарные затраты времени доступа на данном уровне;

t_{cp} - средние затраты времени на каждом уровне;

$$t_{cp} = \frac{t}{j_{\max}};$$

t - затраты времени на полную разборку объекта;

$j_{\max}$ - число уровней доступа в графе доступа исследуемого объекта, без учета нулевого уровня.

С целью определения области существования вершин α и уровня β проводится исследование их границ.

Для критерия вершин α_i :

$$\alpha_{m_i} \in < 1; m >;$$

$$m \in < 1; \infty).$$

При

$$m \rightarrow \infty, \quad \alpha_{m_i} = 1;$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \alpha_i = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\alpha_{m_i}}{m} = 0.$$

При

$$m = 1, \quad \alpha_{m_i} = 1;$$

$$\alpha_i = \frac{1}{1} = 1.$$

Отсюда вытекает, что

$$\alpha_i \in (0; 1 >. \quad (6.13)$$

Запись (6.13) означает, что для гипотетической машины, для разборки которой потребовалось бы бесконечное число разборочных операций (такая машина состояла бы из бесконечного числа элементов), значение критерия вершины приближается к нулю, а для упрощенной машины, для разборки которой требуется всего одна операция, критерий равен единице.

Исследование границ критерия β_j проводится при значении показателя степени РВД равном единице, поскольку в данном случае, относящимся к граничным условиям, его значение несущественно

$$\beta_{jn} \in < 0; \beta_{\max} - 1 >;$$

$$\beta_{\max} \in < (2; \infty).$$

При

$$\beta_{\max} \rightarrow 0,$$

$$\lim_{\beta_{\max} \rightarrow 0} \beta_j = \lim_{\beta_{\max} \rightarrow 0} \left(1 - \frac{\beta_{jn}}{\beta_{\max}} \right) = 0.$$

При $\beta_{\max} = 2$, $\beta_{jn} = 0$, тогда

$$\beta_j = 1 - \frac{0}{1} = 1.$$

Отсюда

$$\beta_j \in (0; 1) >. \quad (6.14)$$

Запись (6.14) означает, что для гипотетической машины, при разборке которой образовалось бы бесконечное количество уровней доступа, критерий $\beta_j \rightarrow 0$, а для сверхпростой, упрощенной машины, при разборке которой был бы всего один уровень доступа - конечный, критерий $\beta_j = 1$.

Реально существующие машины состоят из конечного числа элементов и характеризуются конечным числом уровней доступа. Отсюда вывод, что область их существования находится в пределах между сверхпростым и самым неудачным вариантами конструкции. Таким образом, оценка совершенства конструкции с точки зрения РТ определяет, в какой степени конструктивный вариант исследуемой машины приближается к одному из этих случаев.

Для определения уровня РТ вводится оценка совершенства конструкции S_n^0 , которая с учетом вышеприведенных критериев отображает совершенство конструкции.

Качественная оценка степени совершенства конструкции (КОССК) определяется по формуле:

$$S_n^0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{j_{\max}^i-1} \alpha_{ij} \beta_{ij}, \quad (6.15)$$

где n - количество элементов конструкции.

КОССК определяется для конструкций с конечным числом элементов, т.е. для реально существующих машин. Как следует из

формул (6.13) и (6.14), значения КОССК будут находиться в пределах

$$\frac{n+1}{2n} \leq S_n^0 \leq 1.$$

Учитывая, что число дуг графа доступа

$$m = \sum_{j=0}^{n-1} f_n(j),$$

формула (6.15) после преобразований принимает вид:

$$S_n^0 = 1 - \frac{1}{mn^{\gamma}} \sum_{j=0}^{n-1} j^{\gamma} f_n(j). \quad (6.16)$$

Для наглядности и удобства пользования целесообразно КОССК выражать в процентах

$$S_n = \frac{S_n^0 - 0,5}{0,005} [\%]. \quad (6.17)$$

Подставляя значение (6.16) в (6.17), после преобразований получим:

$$S_n = 100 - \frac{200}{mn^{\gamma}} \sum_{j=0}^{n-1} j^{\gamma} f_n(j) [\%]. \quad (6.18)$$

Область оценки РТ реальных конструкций (с конечным числом элементов) представлена на рис.6.6. Как видно, даже для конструкции, состоящей из небольшого числа элементов, существуют большие потенциальные возможности улучшения РТ. Одновременно заметно, что конструкцию, состоящую даже из нескольких элементов, можно спроектировать настолько неудачно, что уровень ее РТ может быть близок к уровню наихудшего конструктивного варианта.

Область оценки ремонтной технологичности конструкций

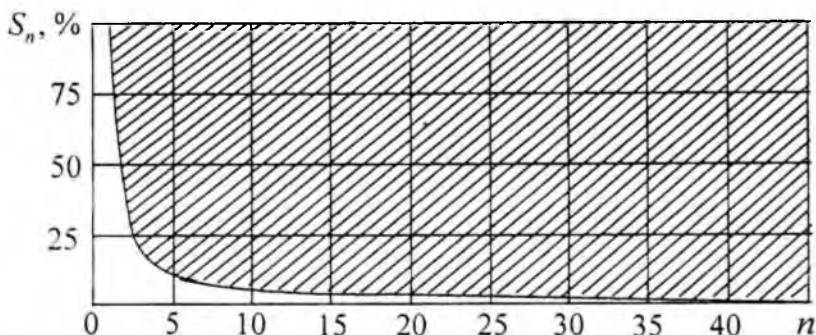


Рис. 6.6.

Применение данного способа оценки возможно на стадиях проектирования, испытаний и эксплуатации технических объектов.

Метод прост и нагляден, легко составляются для него соответствующие алгоритм и программа, что позволяет сократить время расчетов. Универсальность оценки позволяет применить ее не только для изделий нефтепромыслового машиностроения, но и в других областях техники.

6.1.3. Влияние распределения времени доступа по уровням на степень совершенства конструкции

С целью исследования влияния распределения времени доступа по уровням на оценку РТ конструкции, по имеющимся данным рассмотрена зависимость функции КОССК от изменения аргумента - показателя степени γ , т.е. показателя распределения времени доступа по уровням. Исследования проводились с помощью соответствующей компьютерной программы для всех трех случаев доступа - общего, внешнего и внутреннего. Показатель изменялся в пределах от 0 до 3 с постоянным шагом 0,05 [17].

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. График зависимости КОССК от γ , изменяющегося в заданных пределах, является возрастающей функцией, принимающей отрицательные, положительные значения, нулевое значение и асимптотически приближающееся к верхней границе качественной оценки степени совершенства конструкции (КОССК) - 100%.

2. На графике (рис. 6.7) можно выделить четыре зоны.

- зона, в которой КОССК принимает значения ниже нуля и нулевое значение;
- зона, в которой КОССК растет с относительно большой интенсивностью;
- зона, в которой интенсивность прироста КОССК уменьшается;
- зона, в которой интенсивность прироста КОССК незначительна и график практически превращается в линию, параллельную оси абсцисс.

Область, где КОССК принимает значение меньше нуля и нулевое значение, следует считать зоной, в которой постановка задачи обеспечения РТ теряет смысл. В техническом смысле можно полагать, что если показатель γ исследуемой конструкции попадает

в эту зону, то влияние неблагоприятных внешних факторов настолько велико, что РТ не может себя проявить, независимо от совершенства конструкции.

График функции $S_n(\gamma)$ с зонами, выделенными на основании ее первой производной

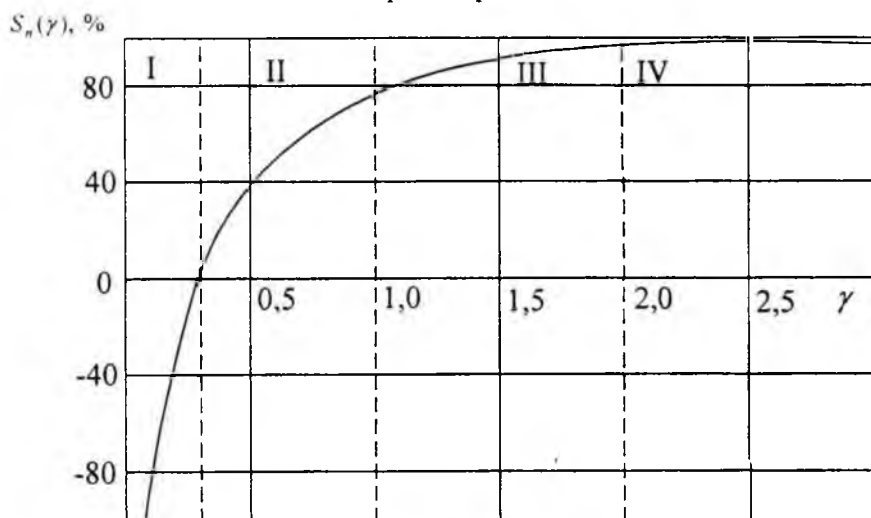


Рис. 6.7.

Вторая область, где КОССК принимает положительные значения и возрастает относительно быстро, определяет зону, в которой за счет даже небольших изменений конструкции (или влияния внешних факторов) можно добиться значительного эффекта по повышению РТ. В этой зоне совершенствование РТ наиболее целесообразно и эффективно.

Третья область, в которой рост значений КОССК замедляется, является зоной, в которой добиться повышения РТ сложнее, чем в предыдущей зоне. Однако, с учетом функциональных качеств объекта, экономических показателей, степени усложнения конструкции из-за повышения уровня РТ, следует окончательно проверить выбранный вариант обеспечения РТ. Если проверка показала, что дальнейшее совершенствование РТ нецелесообразно (ухудшение других показателей объекта, отрицательный экономический эффект, неоправданное усложнение конструкции), можно конструкцию оставить без изменения. В противном случае конструкция дорабатывается.

Четвертая область, в которой значения КОССК практически не растут, означает, что КОССК достигла своего предельного максимального значения. Поэтому повышение уровня РТ конструкции в этой области считается нецелесообразным. Оно не дало бы желаемого эффекта, а связано было бы только с необоснованными затратами, усложнением конструкции и т.п.

При разработке конструкции желательно, очевидно, "попасть" сразу в четвертую зону, где можно допустить, что практически внешние условия не влияют на проявление РТ в максимальной степени.

Возможны случаи, когда полученные для исследуемой конструкции значения КОССК находятся в пределах 2 или 3 зоны, но исходя, прежде всего из функциональных или других свойств объекта повышение уровня РТ не представляется возможным. В таких случаях достигнутое значение КОССК следует считать максимальным для данного объекта, поскольку разработку прежде всего необходимо ориентировать на обеспечение функциональных свойств изделия, а потом РТ и других свойств.

Если определение пределов 1 и начала 2 областей несложно, то в случае 3 и 4 зоны могут возникнуть некоторые затруднения. Предлагается следующий подход к решению этой проблемы: с целью выявления границы между 2 и 3 зонами, для функции $S_n(\gamma)$ строится график ее производной. Сравниваются попарно значения производных и если разницы последующих трех пар значений не выходят за заданный заранее предел, то первая из сравниваемых точек принимается за границу между 2 и 3 зонами на графике функции $S_n(\gamma)$. Таким же образом находится начало границы 4 зоны (см.рис.6.8).

Указания, касающиеся показателя влияния внешних факторов на РТ, можно свести к следующему.

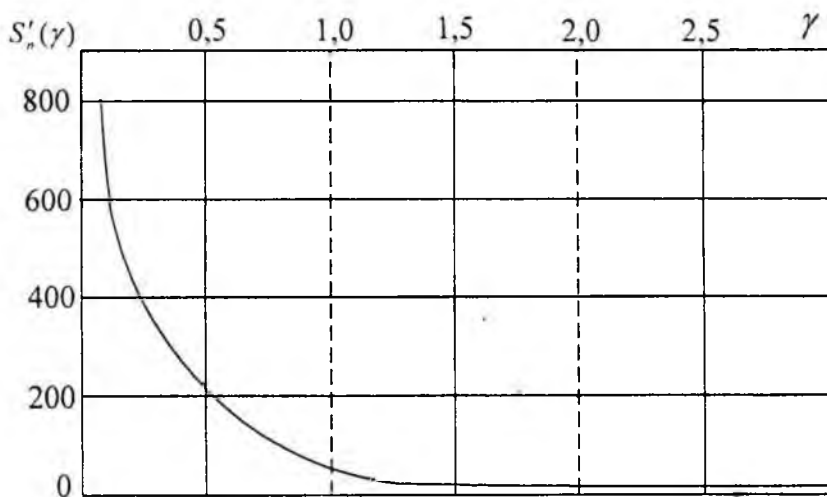
1. На начальных этапах проектирования, когда отсутствуют исходные данные для определения показателя РВД γ , допускается принять его значение равным единице. Однако необходимо учесть, что полученная КОССК будет являться в таком случае некоторой "исходной" величиной, которая в дальнейшем, после уточнения влияния внешних факторов на РТ, может отклоняться в лучшую или худшую сторону.

2. На последующих этапах проектирования рекомендуется следовать нижеизложенному порядку:

2.1. Определить суммарное время доступа по уровням и занести их в исходные данные программы для определения показателя распределения времени доступа по уровням;

2.2. Последовательно получить значения показателей РВД и КОССК, определить исходные данные пределов 2-3 и 3-4 и затем получить графики $S_n = f(\gamma)$ и $S'_n = f'(\gamma)$ (см.рис.6.8 и 6.9) для заданных значений с обозначенными зонами;

График первой производной функции $S'_n(\gamma)$ с выделенными точками для определения границ между зонами



Принятый шаг обусловлен экономическими критериями для определения границ между зонами: 2 и 3 - $Z_{2,3} = 5$,
3 и 4 - $Z_{3,4} = 0,5$.

Рис. 6.8.

2.3. Если полученное ранее значение КОССК попало в 1 зону - направить конструкцию на принципиальную переработку или выявить причины (совокупность внешних факторов), которые привели к получению столь низкого значения показателя распределения времени доступа по уровням;

2.4. Если значение КОССК для конкретного объекта обнаружилось в 4 зоне - считать отработку конструкции на РТ удовлетворительной и направить проект на последующие стадии или в реализацию;

Алгоритм обеспечения ремонтной технологичности конструкции

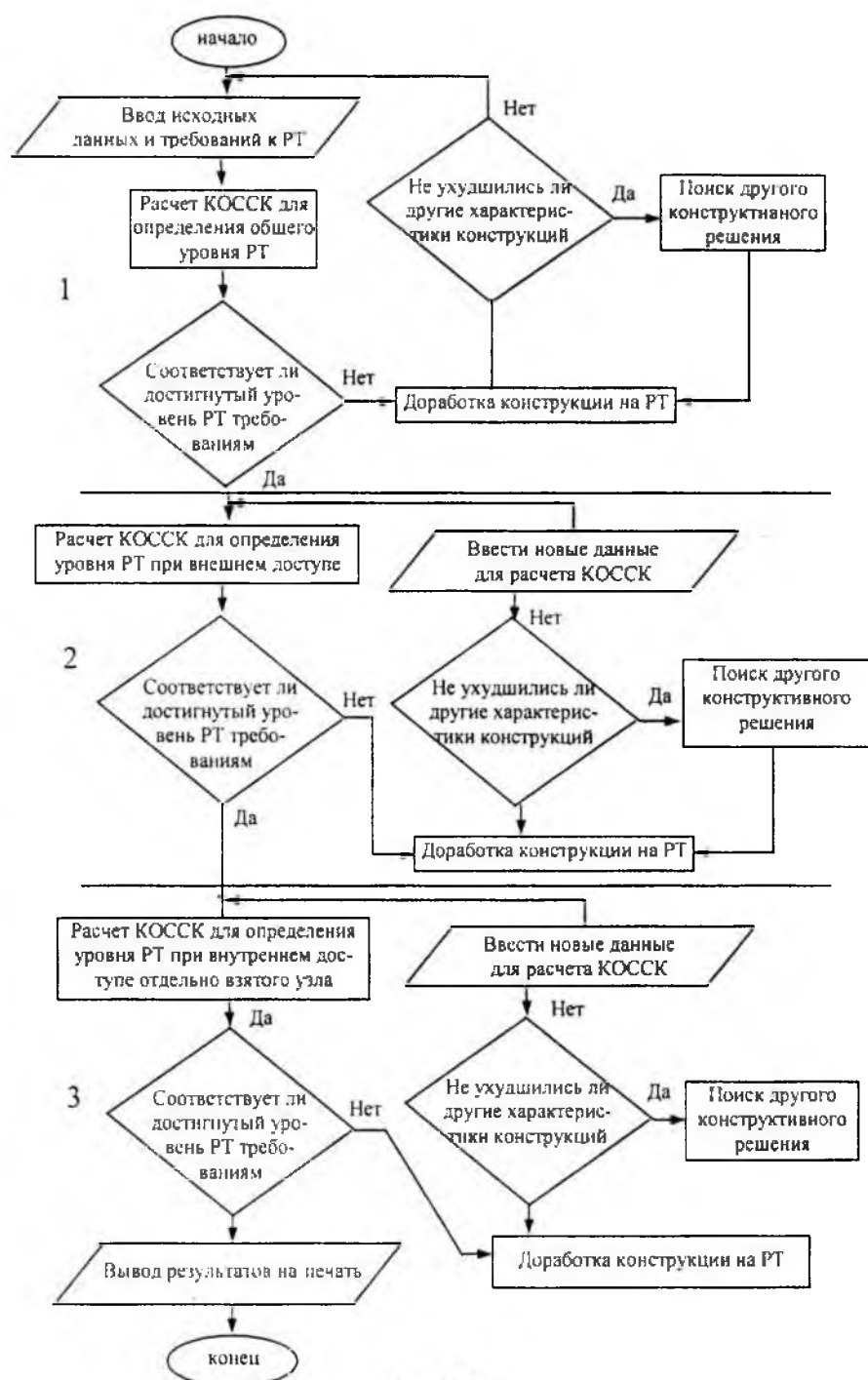


Рис. 6.9.

2.5. Если это значение КОССК оказалось во 2 зоне - направить проект на доработку на РТ;

2.6. Если это значение КОССК оказалось в 3 зоне - производить проверку достигнутого уровня РТ. В случае, когда проверка покажет целесообразность повышения уровня РТ - направить проект на доработку. В противном случае - направить проект на следующую стадию или в реализацию;

2.7. после введенных изменений проверить, не повлияло ли повышение уровня РТ на ухудшение других свойств конструкции, прежде всего функциональных.

Данная последовательность действий при оценке уровня РТ конструкции обеспечивает учет влияния внешних факторов на РТ исследуемого объекта и способствует повышению точности оценки.

Программа обеспечения РТ конструкции разработана на базе вышеизложенных предпосылок и представлена в виде алгоритма на рис.6.9. Последовательность блоков программы может меняться в зависимости от конкретных целей и возникших при проектировании проблем.

Задача определения, а тем более прогнозирования показателей РТ, не имеет однозначного решения, поскольку уровень РТ зависит от большого числа внутренних и внешних факторов, неравносильно влияющих на его показатели

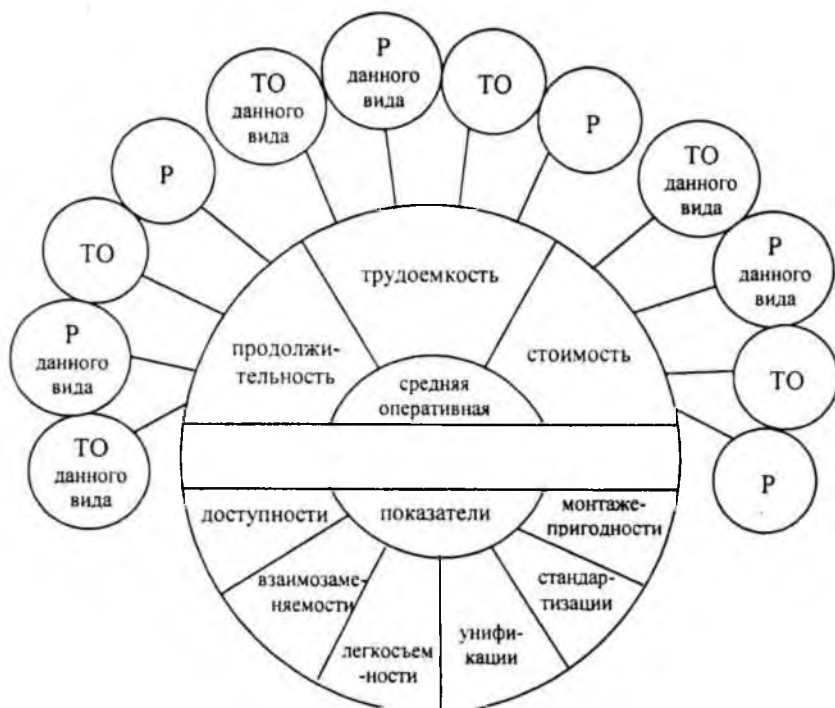
При выборе количественных показателей (рис.6.10) на стадии проектирования предпочтение отдается таким, определение которых возможно с достаточной точностью на основании достоверных данных из имеющейся технической документации.

Из совокупности более десяти внутренних факторов (см. рис.6.11) наиболее существенными для нефтепромыслового оборудования являются: масса снимаемых деталей, их число, количество крепежных деталей, стопорений и сопряжений с натягом. Чтобы не усложнять расчеты и сократить время их выполнения, для получения ориентировочных показателей достаточно ограничиться этими факторами.

В данном случае основными показателями следует принять средние оперативные затраты времени, труда и средств на восстановление работоспособного состояния, а в качестве дополнительных - коэффициенты доступности, взаимозаменяемости, легкосъемности, унификации и стандартизации.

При исследовании конструкций чаще всего в качестве определяющего критерия принимают среднюю оперативную трудоемкость ремонта данного вида.

Показатели технологичности при техническом обслуживании и ремонте



ТО - техническое обслуживание; Р - ремонт

Рис. 6.10.

Рассматриваются графы доступа, содержащие все элементы конструкции, т.е. отображающие полную разборку объекта. Исходя из соображений, представленных в разделе о том, что графы доступа отражают только необходимые операции при разборке и сборке объекта и вытекающего из этого следствия, вес вершин графа не учитывается.

Каждой вершине графа приписывается пять характеристик, относящихся к элементу, изображенному вершиной - время, затраченное на разборку детали, масса детали, количество связанных с деталью крепежных элементов, стопорений и посадок с натягом. Характеристики эти используются в дальнейшем при расчетах как качественных, так и количественных показателей ремонтной технологичности конструкции.

Основные факторы, влияющие на ремонтную технологичность объекта



Рис. 6.11.

Для расчета КОССК из графов доступа извлекается информация о способе перехода с высшего уровня доступа на низший, отображаемая полустепенями исхода вершин.

КОССК вычисляется для случая внешнего и внутреннего доступов к рассматриваемым элементам изделия, а также исследуемого узла в целом, посредством объединения внешнего и внутреннего доступов.

Разработка методики выявила ряд проблем, связанных как с объектом исследований, на примере которого она проверялась, так и с самой методикой. Некоторые вопросы относятся к применению методики для других видов нефтепромыслового оборудования. Иные касаются направлений поисков рационального уровня РТ и особенностей методики для различных этапов создания оборудования.

Представляет также интерес исследование влияния сочетания конструктивных и внешних факторов на совершенство конструкции с точки зрения РТ. Необходима оценка предполагаемого экономического эффекта по внедрению методики в процесс проектирования. Рекомендации по качественной оценке РТ на различных этапах разработки конструкции обосновываются следующим образом:

1) На стадии технического предложения производится выбор конструктивного решения и (или) компоновки основных составных частей изделия. Поэтому, поскольку не рассматривается еще окончательный вариант, нет смысла оценивать уровень его РТ. Кроме того, на этой стадии нет достаточного количества исходных данных.

2) На стадии эскизного проекта производится анализ соответствия компоновок и вариантов конструкции условиям технического обслуживания и ремонта. Из количественных показателей РТ определяется приближенное значение коэффициента сборности. Для определения качественных показателей все же не хватает еще исходных данных. Кроме того, их определение преждевременно, поскольку на этой стадии большое внимание уделяется другим характеристикам объекта и показатели РТ отступают на второй план. Однако, для технических объектов, в которых РТ является одним из первостепенных свойств, при наличии достаточного количества данных можно предварительно попытаться оценить приближенным способом (принимая $\gamma = 1$) степень совершенства конструкции с точки зрения ее РТ. Необходимо отметить, что точность оценки по данной методике зависит только от исходных данных.

3) Проблема соответствия составных частей изделия требованиям технического обслуживания и ремонта выявляется наиболее четко на стадии технического проекта, когда в распоряжении имеются уже относительно сформированные разработки и появляются конкретные исходные данные для качественной оценки степени совершенства конструкции (КОССК). Технический проект надо считать той фазой разработки, на которой начинается отработка и ориентирование совершенствования конструкции в направлении РТ. Поэтому на этой стадии рекомендуется определение КОССК и последующее рассмотрение компонентов конструкции, оказывающих на РТ наибольшее влияние. Хотя РТ не является основным свойством конструкции и ориентирование разработки конструкции исключительно на нее было бы неверно, однако решение с ней связанных вопросов нельзя откладывать на последний этап разработки объекта. Это могло бы привести к созданию недоработанной с точки зрения РТ конструкции, что выявилось бы только во время испытаний или эксплуатации. Такое обстоятельство, в лучшем случае, привело бы к дополнительным затратам на переработку проекта в его конечной стадии, ввиду выявления, например, принципиально неприемлемых решений, касающихся РТ изделия.

Для сопоставления, из количественных показателей РТ рекомендуется определить приближенные значения коэффициентов унификации и сборности (обязательно) и среднюю оперативную стоимость технического обслуживания (ремонта) данного вида (необязательно).

4) На стадии разработки рабочей документации опытного образца или изделия единичного производства осуществляется, среди прочих, поэлементная отработка конструкции деталей и сборочных единиц на технологичность, определение доступности и легкосъемности сменных и требующих технического обслуживания и ремонта составных частей изделия.

При испытании опытного образца проверяются, с точки зрения РТ, возможности доступа к составным частям, удобство установки и объем составных частей изделия при техническом обслуживании и ремонте. Производится анализ технологичности разборки опытного образца, проверка соответствия технологичности конструкции требованиям к РТ.

Рассчитываются - после отработки конструкции при изготовлении и испытании опытного образца - следующие количественные показатели РТ: приближенные значения средних оперативных тру-

доемкостей и стоимостей ремонта данного вида, а также значения коэффициента сборности и коэффициента унификации.

Исходя из этих соображений, на стадии разработки рабочей документации опытного образца целесообразно определение КОССК. Имеются достоверные и однозначные исходные данные - чертежи, спецификации и сведения о технологии разборки и ремонта и пр., что дает возможность оценки качественной стороны РТ конструкции.

5) Стадия разработки рабочей документации серийного (массового) производства включает:

- окончательное принятие решений по совершенствованию условий выполнения работ при эксплуатации и ремонте изделия и отражения этих решений в технической документации;

- доводку конструкции до соответствия требованиям существующей и создаваемой системы ремонта и технического обслуживания;

- оценку соответствия доступного уровня РТ требованиям, представленным в техническом задании;

- оценку РТ путем проведения испытаний или организации сбора данных о ремонтной технологичности изделия в процессе эксплуатации и ремонта.

На этой стадии определение КОССК проводится, с целью оценки достигнутого окончательного уровня РТ, методами средних оперативных трудоемкости и стоимости технического обслуживания (ремонта) данного вида и коэффициента сборности, и необязательно в общем случае определение средней оперативной продолжительности технического обслуживания (ремонта) данного вида и коэффициента унификации конструктивных элементов.

Исходя из действующих стандартов на рис.6.12 представлены рекомендации по применению методики, перечень действий связанных с обеспечением РТ на различных стадиях создания изделия, а также включением отработки конструкции на РТ в программы обеспечения и повышения надежности. Звездочкой отмечена возможность применения на данном этапе разработки предложенной методики оценки РТ конструкции.

Одновременное применение качественных и количественных показателей дает возможность более полной оценки уровня РТ и предупреждает затруднения при принятии решения о выборе лучшего варианта конструкции в двух типичных случаях, которые могут возникнуть на практике.

Рекомендации по обеспечению ремонтной технологичности на различных стадиях проектирования конструкции

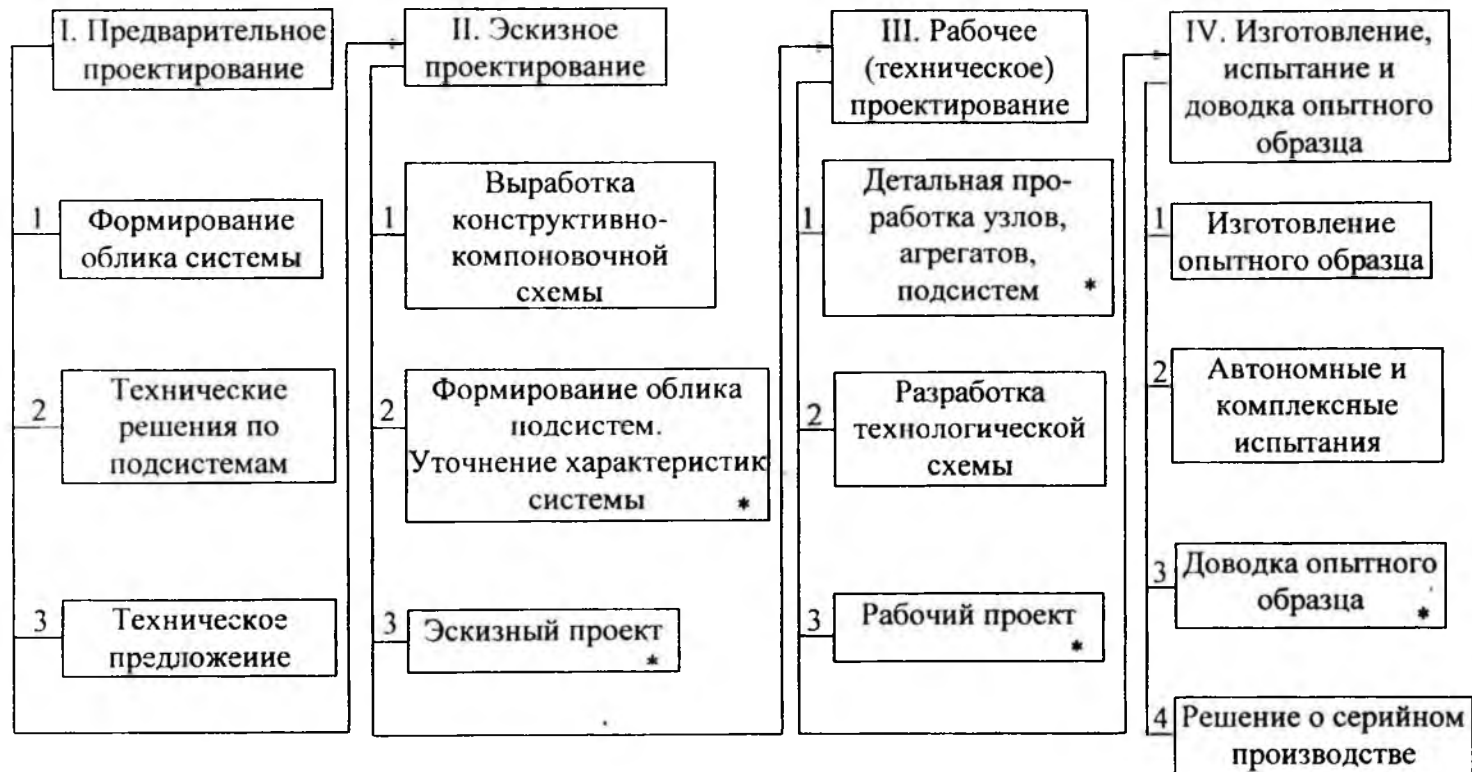


Рис.6.12.

Суть первого случая выражается в том, что, например, количественные показатели вариантов конструкции имеют одинаковые значения, или их значения незначительно отличаются друг от друга. Тогда решение о свойствах конструкции принимается на основании качественного показателя.

Второй случай возникает, когда качественные оценки совпадают, и решение осуществляется исходя из различия между количественными показателями РТ.

Гипотетически возможно, что оба вида оценок не будут отличаться друг от друга. Такой случай маловероятен на практике, но все же решение при таком совпадении будет зависеть, прежде всего от уровня функциональных свойств изделия и других факторов.

Среди перечисленных выше факторов, которые необходимо учитывать при отработке РТ конструкции изделия, наиболее важными являются:

- вид производства - единичное, мелкосерийное, крупносерийное, массовое;
- эксплуатационные требования - климатические условия, квалификация обслуживающего персонала, особые требования заказчика и пр.;
- характеристика отказов - интенсивность их появления для данной детали, сборочной единицы;
- затраты времени на восстановление объекта.

Принятие решения о целесообразности совершенствования данного конструктивного варианта, после его оценки по предложенной методике, должно осуществляться с учетом перечисленных факторов.

Таким образом, результаты анализа данных по отдельным видам оборудования свидетельствуют о множестве нерешенных проблем, связанных с проявлением ремонтной технологичности на практике. Заложенные в конструкции характеристики ремонтной технологичности проявляются в зависимости от многих случайных факторов, трудно поддающихся формализации. Проверка предложенной методики для конкретных конструкций подтвердила эффективность ее использования.

Разработанная методика комплексной оценки ремонтной технологичности конструкции благодаря своей универсальности применима как для проектируемого, так и для существующего оборудования. Область ее приложения не ограничивается нефтепромыс-

ловым оборудованием, возможно ее распространение и на другие технические объекты.

Теоретический аппарат методики позволяет производить качественную и количественную оценку РТ конструкции. На основании сравнения полученных результатов с заданными требованиями к РТ принимается решение о дальнейшей доработке конструкции на РТ или о направлении ее на следующие этапы разработки.

6.2. Практическое применение методики комплексной оценки уровня ремонтной технологичности

В качестве примера для рассмотрения РТ нефтепромыслового оборудования выбрана подъемная установка для подземного ремонта скважин АЗИНМАШ-43П.

Основные доводы при выборе подъемной установки АЗИНМАШ-43П в качестве объекта исследования были следующие: установки данного типа имеются на промыслах республики в наибольшем количестве; установка подвергается техническому обслуживанию, текущим и агрегатно-узловым ремонтам в основном непосредственно в условиях эксплуатации; в опубликованной литературе имеется достаточный статистический материал, содержащий необходимые данные об отказах данной установки.

6.2.1. Исходные данные для оценки ремонтной технологичности передвижной подъемной установки

Для оценки РТ конструкции подъемной установки АЗИНМАШ-43П используется качественный подход - оценка степени совершенства конструкции с учетом количественных показателей - среднего времени восстановления и количества отказов.

При практическом применении методики количественной и качественной оценки степени совершенства конструкции (КОССК) использовались: техническая документация на установку и ее сборочные единицы, технология сборки и разборки, руководство по эксплуатации, ремонту и обслуживанию, нормативные документы для определения затрат времени, труда и средств на ремонтные операции.

Установка АЗИНМАШ-43П предназначена для производства спуско-подъемных операций при текущем и капитальном ремонте

скважин, оборудованных спускоподъемными устройствами (вышки, мачты). Монтажной базой подъемника является гусеничный трактор типа Т-100МБ. На задней (по ходу движения) стенке корпуса главной передачи трактора установлена четырехскоростная реверсивная коробка передач, ведущий вал которой посредством шлицевой муфты соединяется с валом вывода мощности трактора. Ведомый вал коробки передач через приводной вал передает вращение на барабан лебедки. Кинематическая схема установки представлена на рис.6.13.

Кинематическая схема подъемной установки
АЗИНМАШ-43П

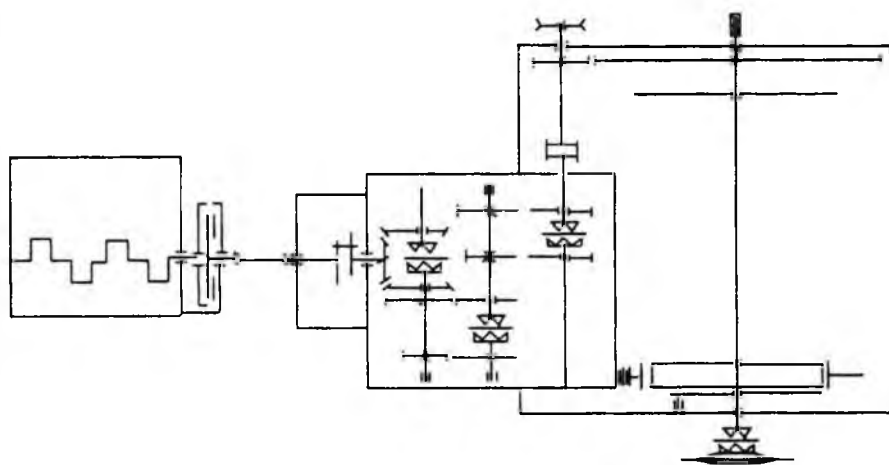


Рис. 6.13.

Основными узлами подъемной установки являются: двигатель, трансмиссия и объединяющая их тракторная база, коробка перемены передач и лебедка. Кроме того, можно выделить электрическую и пневматическую системы, входящие в систему управления установкой.

Обработка статистического материала об эксплуатации передвижных подъемных установок АЗИНМАШ-43П позволила получить исходные данные для исследования ремонтной технологичности (РТ) установки. В табл.6.1 приведена структура основных причин отказов установок, а в табл.6.2 указаны сведения о количестве их отказов и среднем времени восстановления их работоспособного состояния.

Таблица 6.1.

**Структура основных причин отказов передвижной подъемной
установки АЗИНМАШ-43П**

Агрегат (система) установки	Основные причины отказов, %						И Т О Г О %
	износ	внезапные отказы	заводские дефекты	несоблюде- ние правил эксплуата- ции	конструк- тивные недостатки	прочие	
Транспорт- ная база	13,08	14,95	43,86	12,83	0,32	14,96	100
Коробка перемены передач	15,39	28,23	28,79	14,40	-	13,19	100
Подъемная лебедка	33,30	28,57	4,76	9,52	4,76	19,09	100
Электро- система	12,50	31,25	-	10,85	39,15	6,25	100
Пневмо- система	28,95	15,79	10,52	1,23	18,42	25,09	100
В среднем по установ- ке	20,6	23,7	17,5	9,8	12,5	15,9	100

Таблица 6.2.

**Сведения об отказах передвижных подъемных установок
АЗИНМАШ-43П**

Отказавший агрегат (система)	Количество отказов, %	Среднее время восстановления, %
Транспортная база	34,81	25,55
Коробка перемены передач	35,52	32,52
Подъемная лебедка	9,75	28,65
Электросистема	3,39	5,74
Пневмосистема	16,53	7,54
Итого, %	100	100

Анализ данных табл.6.1 показывает, что в среднем по характеру проявления наибольшее количество отказов носит внезапный характер, затем следуют постепенные отказы из-за некачественного изготовления, конструктивных недостатков и из-за несоблюдения правил эксплуатации.

Как вытекает из структуры отказов (табл.6.2), процент отказов электросистемы равен 3,39%, а время восстановления 5,74% от общего времени восстановления. Процент отказов пневмосистемы равен 16,53% от общего количества отказов, а время восстановления составляет 7,54%.

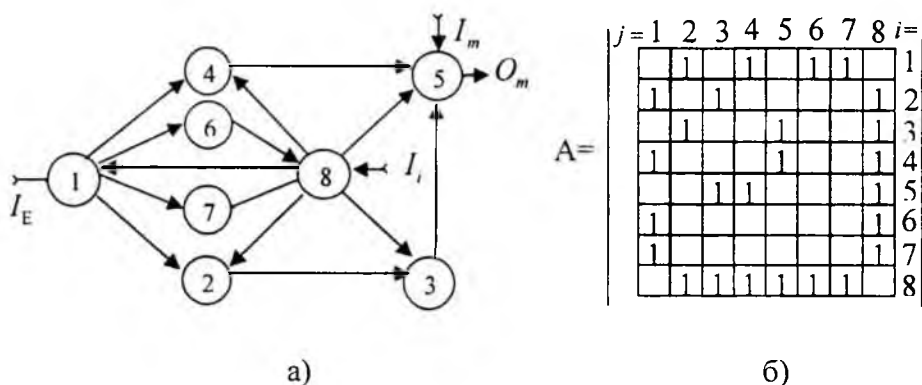
Данные эти свидетельствуют о том, что отказы этих систем имеют место относительно редко и на их устранение затрачивается сравнительно немного времени. Не рассматривается также система управления установкой, поскольку в ее состав, наряду с механическими средствами управления, входят электрическая и пневматическая системы.

Лебедка и коробка перемены передач обладают одинаковыми, довольно высокими рангами, а количество их отказов в общем балансе установки составляют соответственно 9,75% и 35,52%. Время восстановления для коробки перемены передач - 32,52% а для лебедки - 28,65% от общего времени восстановления установок (см.табл.6.2). Следовательно, целесообразно изучение ремонтной технологичности коробки перемены передач и лебедки.

Кроме того, основанием выбора узлов для исследований служит представленная на рис.6.14 матрица доминирования для установки АЗИНМАШ-43П. Полученные из нее ранги перечисленных узлов подтверждают правильность выбора. Первые три элемента не принимаются во внимание в связи с тем, что они представляют интерес для изучения в области тракторостроения и не относятся непосредственно к нефтепромысловому оборудованию. Электро- и пневмосистемы не рассматриваются, поскольку обладают низкими значениями рангов.

Сопоставляя количество отказов и время восстановления коробки перемены передач, можно сделать предварительный вывод, что поскольку значения этих величин сравнимы, ремонтная технологичность данного узла находится на удовлетворительном уровне. Из данных же по лебедке видно, что сравнительно небольшое количество отказов влечет за собой довольно высокое время восстановления, что приводит к предварительному выводу или о низком уровне РТ, или об очень сложной структуре лебедки, обусловленной ее функциональными требованиями.

Определение рангов сборочных единиц подъемной установки
АЗИНМАШ-43П



в)

$R = A + A^2 =$

$j=1$	2	3	4	5	6	7	8	$i=$
4	1	1	1	1	1	1	4	1
1	2	3	2	2	2	2	2	2
1	2	3	2	2	1	1	3	3
1	1	2	3	2	2	2	2	4
1	2	2	2	3	1	1	3	5
1	1	1	2	1	2	2	1	6
1	1	1	2	1	2	2	1	7
4	2	3	2	3	1	1	6	8

$R_1=14$
 $R_2=16$
 $R_3=15$
 $R_4=15$
 $R_5=15$
 $R_6=11$
 $R_7=11$
 $R_8=22$

- а) структурный граф установки
 1 - двигатель; 2 - трансмиссия; 3 - ходовая часть (база);
 4 - коробка перемены передач; 5 - лебедка; 6 - электро-
 система; 7 - пневмосистема; 8 - центр управления (кабина);
 б) матрица непосредственных связей графа;
 в) матрица доминирования структурного графа.

Рис. 6.14.

Разделение оценки РТ по внешнему и внутреннему доступу и по объекту в целом дает возможность проследить соответственно за РТ узлов по отношению к ремонту агрегатным методом; РТ самого узла, взятого отдельно (ремонт в условиях специализированной мастерской), и приспособленностью конструкции узлов ко всевозможным ремонтным ситуациям в сопоставлении со всей установкой.

Данные о количественном соотношении отказов и времени восстановления отдельных узлов (см.табл.6.2) свидетельствуют, что наибольшая доля отказов приходится на коробку перемены передач и транспортную базу. По среднему времени восстановления первое место занимает коробка перемены передач, затем следует транспортная база и лебедка установки. Сопоставление этих данных свидетельствует о:

- невысоком уровне безотказности коробки перемены передач и в то же время о ее удовлетворительной РТ (процент отказов почти равен проценту среднего времени восстановления);

- невысокой безотказности транспортной базы и о хорошей ее РТ (процент отказов больше процента среднего времени восстановления);

- высокой безотказности лебедки - по сравнению с другими узлами установки - и о низкой ее РТ (процент отказов меньше процента среднего времени восстановления).

Однако, для полной оценки РТ объекта недостаточно исследовать лишь количественные показатели - среднее время восстановления и количество отказов за рассматриваемое время эксплуатации. Необходима также качественная оценка совершенства конструкции, что возможно с применением рассмотренной выше методики качественной оценки степени совершенства конструкции (КОССК).

6.2.2. Качественная оценка ремонтной технологичности конструкции

Качественные оценки РТ обеспечивает получение информации о свойствах исследуемой конструкции, позволяет не только обнаружить слабые места в компоновке объекта, но и выявить направление поиска путей совершенствования конструкции.

Расчеты велись по формуле (6.18). Исходные данные для определения значения КОССК получены из графа доступа и представлены в табл.6.3.

Таблица 6.3

Исходные данные для качественной оценки степени совершенства конструкции

Наименование узла	Коробка перемены передач
Число элементов n	67
Число дуг m	75
Максимальное число уровней доступа $j_{\max}$	18
Значение показателя РВД γ	1
Уровень доступа j	Суммарное число полустепеней исхода $f_n(j)$
0	7
1	7
2	5
3	5
4	5
5	10
6	4
7	5
8	8
9	4
10	3
11	5
12	2
13	2
14	1
15	1
16	1
17	1
18	0

Для упрощения расчета не принимаются во внимание внешние факторы (как и в предыдущих расчетах) и показатель степени γ принимается равным единице.

КОССК, рассчитанная по формуле (6.18), имеет значение:

$$S_{\gamma} = 81,77\%$$

Как видно, метод вычисления прост, требует извлечения из графа доступа минимально необходимого количества информации, а значение оценки уровня РТ конструкции соответствует результатам, полученным на основании статистических данных. Объем вычислений даже для большого количества элементов и уровней доступа сравнительно небольшой. Имеется точка отсчета, т.е. видно насколько исследуемый вариант конструкции отклоняется от гипотетически наихудшего или наилучшего.

Заложенные в объект на этапе проектирования конструктивные свойства, в том числе и РТ, нередко не проявляются в полной мере во время эксплуатации. Происходит это из-за ряда внешних факторов, таких как атмосферные условия, оснащенность технической ремонтной базы, обеспеченность запчастями, квалификации рабочих, организация труда и т.п. (см.рис.6.11). Факторы эти трудно поддаются формализации и поэтому в предложенной методике принято влияние совокупности этих факторов на РТ исследуемого объекта (на время его восстановления). Функцией времени восстановления, а точнее его распределения по уровням доступа, является показатель степени γ .

Данные для определения показателя степени γ приведены в табл.6.4, а значения показателя РВД γ приведены ниже в табл.6.6.

Исходные данные для КОССК уровня РТ (табл.6.5) были взяты из рабочих чертежей и технологии разборки коробки перемены передач (КПП) и лебедки подъемной установки АЗИНМАШ-43П. На их основании выполнялись расчеты и строились графы доступа объектов. Результаты расчетов даны в табл.6.6. В виде примера на рис.6.15 приведен граф общего доступа КПП установки.

Результаты оценки РТ коробки перемены передач свидетельствуют о том, что в целом коробка передач в удовлетворительной степени отработана на РТ, о чем свидетельствует значение КОССК - 86,02%. Видно, что отдельно взятая коробка передач обладает **высокой** РТ (КОССК при внутреннем доступе равна 90,98%), **но хуже** решена проблема компоновки коробки передач и **установки** (КОССК при внешнем доступе равна 74,42%). **Отсюда вытекает, что** повышения РТ коробки перемены передач **можно добиться путем**

Таблица 6.4.

Исходные данные для определения показателя распределения времени доступа по уровням лебедки и коробки перемены передач подъемной установки АЗИНМАШ-43П

Узел	Лебедка			Коробка перемены передач		
Вид доступа	Общий	Внешний	Внутренний	Общий	Внешний	Внутренний
Количество вершин, n	46	21	25	94	27	67
Максимальное количество уровней $j_{\max}$	21	7	14	28	10	18

Таблица 6.5.

Исходные данные для качественной оценки степени совершенства конструкции

Узел	Лебедка			Коробка перемены передач		
Вид доступа	Общий	Внешний	Внутренний	Общий	Внешний	Внутренний
Число элементов, n	48	21	27	94	27	67
Число дуг, m	59	29	30	113	38	75
Максимальное число уровней доступа, $j_{\max}$	21	7	14	28	10	18
Значение показателя РВД, γ	0,88	1,49	0,92	1,32	0,97	1,33

Таблица 6.6

Значения показателя распределения времени доступа по уровням и результаты качественной оценки степени совершенства конструкции для лебедки и коробки перемены передач установки АЗИНМАШ-43П

Узел	Лебедка			Коробка перемены передач		
Вид доступа	Общий	Внешний	Внутренний	Общий	Внешний	Внутренний
Значение показателя РВД, γ	0,88	1,49	0,92	1,32	0,97	1,33
Качественная оценка степени совершенства конструкции, S_n [%]	62,45	93,60	48,96	86,02	74,42	90,98

усовершенствования компоновки установки - изменения местонахождения коробки передач, системы ее креплений, управления и т.д.

Иначе обстоит проблема РТ лебедки. В этом случае внешний доступ к лебедке высок (КОССК=93,6%); пути повышения уровня РТ следует искать в конструкции самой лебедки (КОССК=43,79%). Возможно, что сложность разборки лебедки связана с большим весом ее составляющих элементов и необходимости неоднократного применения во время ремонта грузоподъемных средств. КОССК для лебедки в целом равна 62,45%, что свидетельствует о среднем уровне отработки лебедки на РТ.

Данный подход к исследованию РТ выделяет следующие характеристики конструкции:

- обеспечен ли общий требуемый уровень РТ узла;
- обеспечена ли РТ узла в компоновке всего агрегата;
- обеспечена ли РТ узла, рассматриваемого в отдельности.

Степень обеспеченности РТ выражается через процентное значение КОССК.

Граф общего доступа коробки перемены передач подъемного агрегата АЗИНМАШ-43П

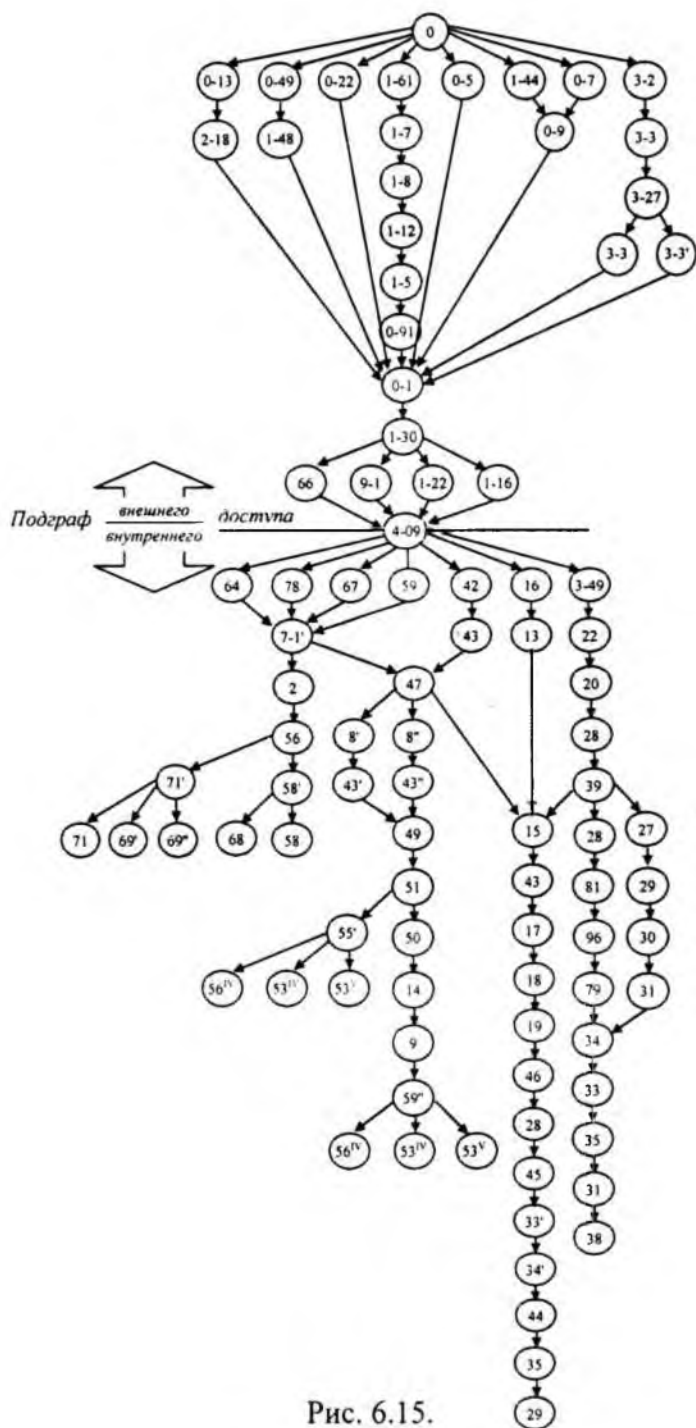


Рис. 6.15.

6.2.3. Результаты оценки ремонтной технологичности конструкции

Целью применения методики оценки РТ на различных этапах создания конструкции и последующего ее совершенствования должно быть получение самой оценки уровня РТ, на основе анализа данных об отказах изделия.

Суть оценки состоит в сопоставлении графа доступа исследуемой конструкции с данными о ее отказах и времени восстановления, полученными при испытаниях опытных образцов или в эксплуатации. По этим данным выделяются детали, у которых количество отказов или время восстановления значительно больше, чем у остальных деталей, и по этой причине их отказы сильнее сказываются на РТ узла. Затем проверяется их расположение на графе доступа и рассматривается возможность повышения РТ путем конструктивных изменений, не приводящих к ухудшению других показателей узла. Достигается это при помощи нижеперечисленных основных мероприятий:

- уменьшение времени доступа к детали;
- перевод детали на более высокий уровень доступа;
- доработка конструкции с целью достижения в графах доступа максимально возможного количества вершин с максимально возможным количеством полустепеней исхода;
- стремление увеличить ширину поля графа доступа за счет уменьшения его глубины;
- создание возможности доступа к выделенным деталям, опуская элементы внешнего доступа к узлу (например, без снятия узла с агрегата);
- установление рационального количества крепежных элементов и стопорений.

Если не удается повысить уровень РТ за счет совершенствования конструкции, необходимо направить поиски в сторону изменения внешних факторов, влияющих на проявление РТ. Мероприятия могут быть связаны с установлением новых принципов организации ремонта, оснащения ремонтных мастерских специальными инструментами, средствами механизации и т.п.

Ниже приведены примеры выявления узких мест конструкций выбранных узлов подъемной установки АЗИНМАШ-43П - лебедки и коробки перемены передач. В табл.6.7 представлена сводка данных о деталях наиболее выделяющихся из статистического материала по количеству отказов и времени восстановления.

Таблица 6.7

Данные о наиболее характерных деталях лебедки и коробки передач по количеству отказов и времени восстановления

Название узла	Название и обозначение детали (в соответствии с рис.6.16)	Количество отказов детали, %	Время восстановления детали, %	Уровень доступа (общий)	Показатель РВД γ для узла при доступе		
					Общем	Внешнем	Внутреннем
Лебедка	1-Диафрагма	58,49	49,32	13	0,88	1,49	0,92
	2-Тормозной шкив	13,20	9,91	20	Количество уровней доступа узла j		
	3-Барaban	9,43	22,21	21	21	7	14
					КОССК, %		
					62,45	93,6	48,96
Коробка перемены передач	1 - ЦЗК $z=22, m=7$	18,71	16,75	23	1,32	0,97	1,33
	2 - КЗК $z=34, m=8$	12,23	11,59	22	Количество уровней доступа узла j		
	3 - ЦЗК $z=21, m=7$	10,07	8,95	18	28	10	18
	4 - ЦЗК $z=28, m=7$	7,91	6,78	20	КОССК, %		
	5 - ЦЗК $z=29, m=7$	6,48	4,74	22			
	6 - Вал реверса	4,32	7,47	13			
	7 - Шлицевая муфта	4,32	6,68	20			
	8 - Вал вывода	5,76	6,45	15	86,02	74,42	90,98
	9 - КЗК $z=17, m=8$	5,76	4,77	14			

На диаграммах (рис.6.16) сопоставлены статистические данные об отказах и времени восстановления деталей лебедки и коробки перемены передач. Графы общего доступа, на которых выделены детали, определяющие уровень РТ узлов, приведены в работе [17]. На основании указанных данных можно сделать следующие выводы.

Лебедка

1. Деталью, от которой в наибольшей степени зависит РТ лебедки, является резиновая диафрагма муфты сцепления (58,49% отказов; 49,32% от общего времени восстановления лебедки). Затем следует барабан (9,43% отказов и 22,21% от общего времени восстановления).

2. Перечисленные детали относятся к внутреннему доступу и находятся соответственно на 13, 21 и 20 уровне доступа.

3. Поскольку две детали, барабан и тормозной шкив, находятся на последнем и предпоследнем уровнях доступа, что обусловлено конструктивными факторами, возможность перемещения их на более высокие уровни доступа практически отсутствует. Повышение уровня РТ может быть достигнуто в случае конструктивных изменений, направленных на уменьшение глубины поля доступа. Перемещение этих деталей с последних уровней доступа потребовало бы создания принципиально новой конструкции всей лебедки. Поиск улучшения РТ лебедки через изменения, связанные с упомянутыми деталями, должен быть скорее направлен в сторону изменения внешних факторов, если принципиальная конструкция лебедки остается без изменений.

4. Диафрагма находится на 13 уровне доступа. Так как она расположена по одну сторону лебедки, то не требует при замене разборки лебедки с противоположной стороны.

5. В связи с вышеизложенным при совершенствовании РТ лебедки поставлены следующие варианты задач, требующих решения:

5.1. Общее положение надежности с целью уменьшения роли РТ, путем увеличения безотказности и ресурса перечисленных деталей.

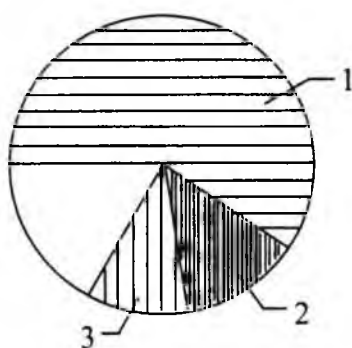
5.2. Принципиально новое конструктивное решение.

5.3. Усовершенствование существующей конструкции путем улучшения внутреннего доступа. на что указывают значения показателя распределения времени доступа по уровням $\gamma_{втр}=0,92$ и $S_{пвтр}=48,96\%$.

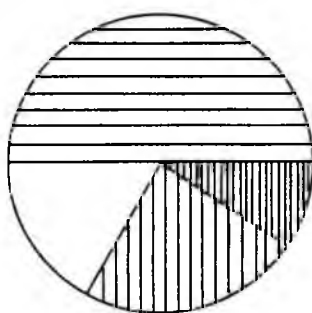
Диаграмма соотношений количества отказов и времени восстановления лебедки и коробки перемены передач подъемной установки АЗИНМАШ-43П

Лебедка

Количество

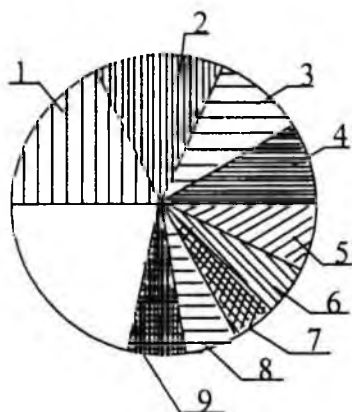


Время

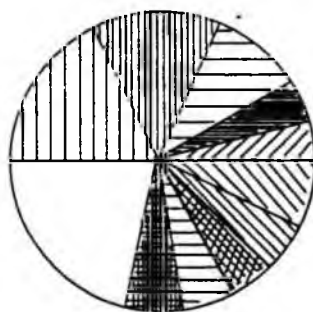


Коробка перемены передач

Количество



Время



Перечень деталей см. в табл. 6.7.

Рис. 6.16.

5.4. Решение конструкторской задачи, в результате которого существовала бы возможность замены диафрагмы, опуская большинство операций внешнего доступа, т.е. без снятия лебедки с установки.

6. Решение хотя бы одной из поставленных задач или их комплекса должно повлиять на повышение уровня РТ лебедки. Значение показателя $S_n=62,45\%$ указывает на значительные резервы конструкции.

Коробка перемены передач

1. РТ коробки перемены передач в наибольшей степени определяет цилиндрическое зубчатое колесо (ЦЗК) 1V скорости ($z=22$, $m=7$) - 18,71% отказов и 16,75% от общего времени восстановления. Затем следует: коническое зубчатое колесо (КЗК) $z=34$, $m=8$ - соответственно 12,23% и 11,59%, цилиндрическое зубчатое колесо $z=21$, $m=7$ - соответственно 10,07% и 8,95% и вал реверса - соответственно 4,32% и 7,47% (см. табл. 6.7).

2. Детали относятся к внутреннему доступу и расположены согласно вышеперечисленному порядку на 23, 22, 18 и 13 уровнях доступа.

3. Конструкция самой коробки перемены передач решена довольно удачно ($\gamma_{втр} = 1,33$ и $S_{пвтр} = 90,98\%$ для внутреннего доступа), что свидетельствует о незначительных возможностях совершенствования ее конструкции.

4. Учитывая расположение коробки передач на установке и невозможность замены упомянутых деталей без снятия ее с установки, предлагается решить следующие конструкторские задачи:

4.1. Улучшение внешнего доступа к коробке передач. На этот резерв указывают значения $\gamma_{внш} = 0,97$ и $S_{пвнш} = 74,42\%$. Внешний доступ можно, например, улучшить путем изменения местонахождения коробки на установке или хотя бы исключения снятия лебедки для доступа к коробке передач.

4.2. Повышение безотказности и ресурса перечисленных деталей.

4.3. Создание принципиально новой конструкции коробки перемены передач с лучшими показателями надежности и РТ. Необходимо отметить, что данная задача более сложна по сравнению с случаем лебедки, поскольку резервов для повышения РТ

коробки относительно немного: $\gamma_{\text{общ}} = 1,32$, $S_n = 86,02\%$. Данный принцип поиска узких мест конструкции можно проводить и на более высоких уровнях, например: узлы - установка, составные части системы - вся система.

6.2.4. Повышение ремонтной технологичности коробки перемены передач подъемной установки

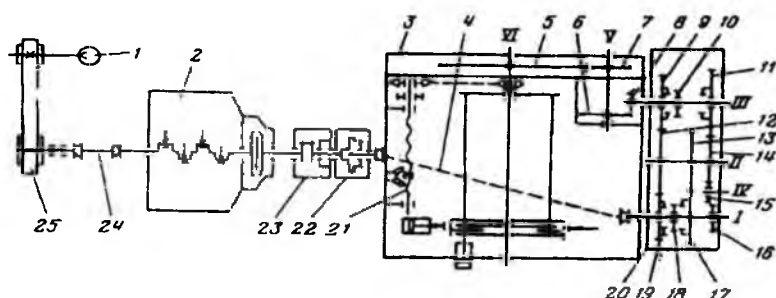
Исходя из выявленных по результатам комплексной оценки РТ установки АЗИНМАШ-43П недостатков, создана новая подъемная установка ЛПТ-8 (см. рис. 1.4).

Как следует из представленной на рис.6.17 кинематической схемы, коробка передач в установке ЛПТ-8 вынесена за лебедочный блок. Это позволило устранить основной недостаток, присущий установке АЗИНМАШ-43П, а именно, улучшить внешний доступ к коробке перемены передач и обеспечить возможность производить ее ремонт без демонтажа лебедки с установки. В результате значительно улучшена ремонтная технологичность подъемной установки этого типа.

Принимая во внимание приведенные выше результаты качественной оценки РТ коробки перемены передач, допускается, что найдена компоновка агрегата, в которой для отсоединения коробки передач не требуется предварительное снятие с агрегата лебедки. На рис.6.18 приведен граф общего доступа коробки передач с измененной компоновкой. Результаты расчета КОССК по исходным данным, приведенным в табл. 6.8, показывают (табл. 6.9), что такое конструктивное решение приводит к улучшению общей КОССК на 4,52%.

Одновременно наблюдается резкое понижение значения КОССК для внешнего доступа (на 49,7%), что связано с другим видом распределения времени доступа по уровням. Факт этот доказывает необходимость исследования внешнего доступа одновременно с общим и подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о единственно правильном направлении конструирования - разработке узлов в комплексе всего технического объекта.

Кинематическая схема подъемной лебедки ЛПТ-8



1-компрессор; 2-двигатель; 3-лебедочный блок; 4, 24-карданный вал; 5, 7-шестерни; 6, 8-шестерни конические; 9-шестерни III и IV скоростей; 10-муфта; 11-шестерни I и II скоростей; 12, 13, 14-шестерни промежуточного вала; 15, 16-шестерни обратного вращения барабана; 17-шестерни II и IV скоростей; 18-муфта переключения скоростей; 19-шестерни I и III скоростей; 20-коробка передач; 21-механизм укладки каната; 22-коробка отбора мощности; 23-муфта сцепления; 25-ременная передача; I-ведущий вал; II-промежуточный вал; III-ведомый вал; IV-ось шестерни заднего хода; V-вал силовой передачи; VI-вал барабана.

Рис. 6.17.

Таблица 6.8.

Исходные данные для качественной оценки степени совершенства конструкции и показателя распределения времени доступа по уровням измененной конструкции коробки перемены передач установки

Вид доступа	Общий	Внешний	Внутренний
Число элементов, n	73	6	67
Число дуг, m	84	9	75
Максимальное число уровней доступа, $j_{\max}$	21	3	18
Значение показателя РВД, γ	1,44	0,61	1,33

Таблица 6.9.

Показатели распределения времени доступа по уровням и КОССК конструктивных вариантов коробки перемены передач установки АЗИНМАШ-43П

Наименование узла	Показатель	Вид доступа		
		общий	внешний	внутренний
Коробка перемены передач без изменений	S_n	86,02	74,42	90,98
	γ	1,32	0,97	1,33
Усовершенствованная коробка перемены передач	S_n	90,54	24,72	90,98
	γ	1,44	0,61	1,33

6.2.5. Количественная оценка ремонтной технологичности коробки перемены передач подъемной установки АЗИНМАШ-43П

В качестве количественного показателя РТ выбрано среднее время восстановления. Значения среднего времени восстановления устанавливались в зависимости от таких конструктивных факторов, как: масса и количество снимаемых деталей, количество крепежа, стопорений и посадок с натягом. Расчеты производились с использованием стандартных компьютерных программ для корреляционно-регрессионного анализа. Получено уравнение множественной регрессии, позволяющее определять среднее время восстановления на основании данных конструкторской документации в зависимости от перечисленных выше факторов.

Для коробки перемены передач полученное уравнение имеет вид:

$$\tau_{\text{вклп}} = 11,08538 - 0,33338a_1 + 1,45251a_2 - 0,07222a_3 + 0,10652a_4 - 0,16296a_5$$

где $\tau_{\text{вклп}}$ - среднее время восстановления коробки перемены передач; и лебедки; a_1 - суммарная масса снимаемых деталей; a_2 - общее количество снимаемых деталей, a_3 - количество крепежных элементов; a_4 - количество стопорений; a_5 - количество посадок с натягом.

Проверка гипотез о множественной регрессии производилась с помощью F критерия. Значения контрольных величин, полученных по выборкам, меньше критических табличных значений, поэтому гипотезы можно принять с вероятностью погрешности

Для коробки перемены передач наибольшее влияние на время восстановления оказывают количество предварительно снимаемых деталей и их масса. Модель регрессии - линейная.

Таким образом, результаты качественной оценки РТ подтверждают высокий общий уровень РТ коробки перемены передач подъемной установки АЗИНМАШ-43П (см.рис.6.18). Оценка выявила потенциальную возможность повышения уровня РТ посредством улучшения компоновки коробки перемены передач с установкой.

Наряду с отработкой конструкций изделий на РТ важными задачами, связанными с улучшением ремонтпригодности (снижением среднего времени восстановления) нефтепромыслового оборудования, являются:

- модернизация серийного оборудования, связанная не только с повышением его мощности и производительности, но и с увеличением ресурсов лимитирующих деталей и ремонтной технологичности конструкции;

- разработка системы технического обслуживания и ремонта, осуществление которой связано в первую очередь с обоснованным определением периодичности их проведения;

- решение первоочередных вопросов технологии и организации технического обслуживания и ремонта оборудования, направленных на управление его техническим состоянием и восстановлением ресурса сборочных единиц, агрегатов и систем.

Указанные направления повышения ремонтпригодности нефтепромыслового оборудования достаточно полно рассмотрены, например, в работах [6, 16, 52].

7. Обеспечение эксплуатационной и монтажной технологичности

Количественная оценка ремонтпригодности в основном сводится к оценке среднего времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Для количественной оценки монтажепригодности используется оценка среднего времени выполнения монтажных работ, а также ряд других показателей.

Более сложным является оценка при проектировании достигнутого уровня технологичности объекта. Для обеспечения требований к конструкции оборудования с точки зрения эксплуатационной технологичности (ЭТ) и монтажной технологичности (МТ) на стадии проектирования требуется проведение сравнительного количественного и качественного анализа найденных при проектировании различных конструктивных решений. Для количественной оценки ЭТ и МТ сборочных единиц и агрегатов наиболее приемлемыми являются методы корреляции и регрессии. Их применение связано с обработкой полученной информации о затратах времени и труда на производство соответствующих работ по изделию-аналогу.

При применении на этапе проектирования методов корреляции и регрессии должны быть соблюдены следующие условия: все случайные величины распределены по нормальному закону, все они независимы и являются наиболее характерными переменными факторами, определяющими конечный результат.

Рассмотренная выше модель функционирования нефтепромыслового оборудования с периодическими разборкой и демонтажом и повторными сборкой и монтажом показала, что дополнительные затраты времени на предэксплуатационное ТО и ремонты, производимые при демонтажно-монтажных работах, могут оказывать значительное влияние на эффективность функционирования оборудования

Установлено, что наряду с требованиями к технологичности, характерными для объектов стационарного монтажа, она охватывает также требования к ЭТ и МТ, а в ряде случаев и к РТ машин и агрегатов. При эксплуатации восстанавливаемых объектов после возникновения каждого отказа эти объекты ремонтируются или заменяются идентичными. При этом моменты возникновения отказов t_i являются случайными величинами, и их последовательность составляет поток отказов. В общем случае потоки отказов оборудо-

вания могут различаться, а по характеру проявления отказы могут относиться к внезапным или постепенным отказам.

В достаточно отработанных конструкциях преобладают постепенные отказы, а предусмотренными видами плановых ремонтных работ являются текущие ремонты (ТР). При этом основное содержание ТР направлено на выполнение замен быстроизнашивающихся деталей и сборочных единиц. Ремонтные работы, связанные с устранением последствий внезапных отказов, являются неплановыми и выходят, как правило, за рамки ТР.

7.1. Количественные показатели для оценки уровня эксплуатационной и монтажной технологичности

В период эксплуатации, из-за постепенного или мгновенного изменения характеристик объекта, могут иметь место отказы деталей и сборочных единиц, для предупреждения которых предусмотрено выполнение в определенном объеме регламентных работ (технического обслуживания и текущих ремонтов, в основном в виде замен быстроизнашивающихся деталей). Основная их цель - уменьшение интенсивности отказов до ее возможного минимального значения.

Для восстановления объекта в условиях эксплуатации в кратчайшие сроки необходимо обеспечение не только требуемого уровня ремонтпригодности, но и эксплуатационной технологичности (ЭТ).

Не менее характерными для нефтепромыслового оборудования являются монтажепригодность и монтажная технологичность (МТ), в особенности машин и агрегатов, подвергаемых периодическим повторным демонтажно-монтажным работам с транспортированием их с точки на точку.

Требования к ремонтпригодности и монтажепригодности, так же как и к технологичности конструкции должны задаваться в виде количественных показателей и качественных характеристик, которые должны включаться в технические задания на разработку и оцениваться при проектировании, эксплуатации и ремонте. При этом, кроме количественных показателей, должны учитываться условия эксплуатации, ремонта и монтажа, а также требования к конструктивному исполнению изделия по приспособленности его к техническому обслуживанию, ремонтным и монтажным работам. К

перечисленным относятся: требования к взаимозаменяемости, унификации и стандартизации составных частей, предусматривающие ограничение номенклатуры и типоразмеров запасных частей, крепежных деталей, смазочных материалов, специального инструмента и приспособлений, используемых при техническом обслуживании (ТО) и ремонте (Р), а также при монтажных работах; требования к принципам рационального членения, к конструктивным способам соблюдения единственности сборки и монтажа изделий, к доступности деталей и сборочных единиц, их легкосъемности; требования к преемственности технологических процессов ТО и Р однотипных изделий и др.

Рассматривая отдельные аспекты ЭТ и МТ необходимо учитывать их тесную взаимосвязь в условиях эксплуатации. ЭТ и МТ характеризуют приспособленность конструкции к выполнению определенных операций ТО и Р и зависят от уровня безотказности и ресурса деталей, сборочных единиц и агрегатов, а также многих конструктивных и эксплуатационных факторов.

Качественный анализ конструкций проектируемого оборудования в отношении РТ, ЭТ и МТ в целом должен проводиться с целью оценки эффективности применяемых конструктивно-технологических решений по обеспечению хорошего доступа к быстроизнашивающимся деталям и сборочным единицам без излишней разборки других частей агрегата и с минимальными затратами труда и средств. Эти решения зависят также от ряда эксплуатационных факторов. К конструктивно - технологическим факторам относятся: доступность, контролепригодность, легкосъемность, преемственность средств ТО и Р, унификация функциональных систем, деталей, сборочных единиц и агрегатов. В группу эксплуатационных факторов входят: формы организации технического обслуживания и ремонта оборудования, состояние производственно - технической базы, квалификация обслуживающего персонала, обеспеченность запасными частями и материалами.

Рассмотрим основные особенности перечисленных выше факторов.

Доступность к объектам ТО и Р является важным фактором сокращения времени и трудовых затрат при проведении плановых видов ТО и Р, а также устранения последствий внезапных отказов.

Доступность к объектам ТО и Р рекомендуется оценивать коэффициентом доступности K_1 , который определяется:

$$K_d = 1 - \frac{\bar{T}_{\text{доп}}}{\bar{T}_{\text{осн}} + \bar{T}_{\text{доп}}}, \quad (7.1)$$

где $\bar{T}_{\text{осн}}$ - средняя трудоемкость выполнения основных работ, чел.-ч;

$\bar{T}_{\text{доп}}$ - средняя трудоемкость дополнительных работ, чел.-ч.

На трудоемкость выполняемых при ТО и Р работ большое влияние оказывает удобство позы исполнителя, так как от этого зависит производительность его труда.

Поэтому при проектировании оборудования должны учитываться принимаемые положения рабочей позы исполнителя при разборке-сборке и возможные физические усилия, развиваемые при этом.

При оценке доступности к объектам ТО и Р учитывается трудоемкость выполнения основных работ, непосредственно связанных с заменой деталей и сборочных единиц, а также - дополнительных действий исполнителя, необходимых для осуществления основных работ.

Контролепригодность объектов ТО и Р. Под контролепригодностью конструкции понимается свойство, характеризующее ее приспособленность к проведению технического контроля параметров, предусмотренных в эксплуатационной документации.

Коэффициент контролепригодности отдельных функциональных систем в целом определяется:

$$K_k = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n_i} T_j K_j}{\sum_{i=1}^{n_s} T_i K_i + \sum_{j=1}^{n_i} T_j K_j}, \quad (7.2)$$

где T_i - трудоемкость разового контроля i -го узла, не требующего демонтажа с объекта, чел.-ч;

T_j - трудоемкость разового контроля j -го узла, требующего обязательного демонтажа с объекта, чел.-ч;

n_t, n_n - число узлов в системе (объекте), соответственно требующих и не требующих обязательного демонтажа для контроля;

K_i, K_j - частота контроля функциональных систем и объекта в целом в течение межремонтного ресурса соответственно не требующих и требующих демонтажа.

Обеспечение контролепригодности конструкций неизбежно связано с дополнительными затратами. Однако, эти затраты оку-

паются за счет повышения безотказности, сокращения расходов на неплановые ремонты и более эффективного использования оборудования. Контролепригодность оказывает значительное влияние на внедрение в практику новых, более эффективных методов выполнения ТО и Р и, в частности, метода обслуживания и замены деталей по техническому состоянию.

Легкосъемность сборочных единиц, агрегатов и систем означает приспособленность их к замене с минимальными трудоемкостью и затратами времени. Легкосъемность во многом определяется применяемыми способами крепления, массой и габаритами сборочных единиц и агрегатов, подлежащих разборке или демонтажу при ремонтах. Поэтому требование легкосъемности имеет важное значение и при агрегатно-узловом ремонте в эксплуатации.

Коэффициент легкосъемности объекта или элемента конструкции:

$$K_A = 1 - \frac{\Delta T_{дм}}{T_{дм}}, \quad (7.3)$$

где $T_{дм}$ - средняя трудоемкость демонтажно-монтажных работ рассматриваемого объекта, чел.-ч;

$\Delta T_{дм}$ - отклонение трудоемкости демонтажно-монтажных работ объекта в сравнении с базовым показателем, чел.-ч.

Взаимозаменяемость деталей и сборочных единиц означает такое их свойство, при котором отказавшая деталь (сборочная единица) может быть заменена любой одноименной деталью, взятой из множества имеющихся однотипных экземпляров. Фактор взаимозаменяемости имеет большое значение для сокращения простоев в ремонте и затрат труда на замену деталей и сборочных единиц.

Коэффициент взаимозаменяемости объекта или элемента конструкции:

$$K_B = 1 - \frac{T_{подг}}{T_{подг} - T_{дм}}, \quad (7.4)$$

где $T_{подг}$ - средняя трудоемкость подгоночных или проверочных работ при замене объекта (элемента конструкции), чел.-ч.

Преимстvenность средств ТО и Р. Под преимстvenностью средств обслуживания и ремонта понимается возможность использования для контроля состояния, технического обслуживания и ремонта нового типа изделия уже имеющихся средств механизации, контрольно-измерительных и других приборов и аппаратуры.

Коэффициент преемственности средств обслуживания и ремонта:

$$K_{\text{пр}} = 1 - \frac{C_{\text{н.о}}}{C_{\text{н.о}} + C_{\text{с.о}}}, \quad (7.5)$$

где $C_{\text{н.о}}$ - стоимость комплекта нового контрольного оборудования для обслуживания и ремонта объекта только данного типа, манат;

$C_{\text{с.о}}$ - стоимость комплекта уже имеющегося в эксплуатации контрольного оборудования, манат.

Унификация функциональных систем, деталей, сборочных единиц и агрегатов. Данный фактор является весьма важным не только для повышения РТ, ЭГ и МТ, но и в целом повышения эффективности эксплуатации парка оборудования. Увеличение числа одних и тех же деталей и сборочных единиц на оборудовании различных типов намного упрощает и удешевляет ТО и Р, уменьшает номенклатуру запасных частей, сокращает число видов потребляемых средств механизации, приборов и аппаратуры. Показатели для оценки перечисленных конструктивно-технологических факторов выражаются, как правило, в виде безразмерных коэффициентов.

Считается, что конструкция полностью отвечает предъявляемым к ней требованиям, если коэффициент, характеризующий его, равен или близок к единице.

Коэффициент унификации устройств сопряжения объекта со средствами диагностирования

$$K_{\text{у.с.}} = \frac{N_{\text{у}}}{N_{\text{о}}}, \quad (7.6)$$

где $N_{\text{у}}$ - число унифицированных устройств сопряжения;

$N_{\text{о}}$ - общее число устройств сопряжения.

Коэффициент унификации контролируемых параметров

$$K_{\text{у.п.}} = \frac{\delta_{\text{у}}}{\delta_{\text{о}}}, \quad (7.7)$$

где $\delta_{\text{у}}$ - число унифицированных параметров объекта, используемых при диагностировании;

$\delta_{\text{о}}$ - общее число параметров, используемых при диагностировании.

В большинстве выполненных работ, посвященных исследованию монтажепригодности [18], технологичность машин и оборудо-

дования при их монтаже определяется отношением затрат труда на выполнение основных операций монтажа к общим затратам труда на монтаж машины. Наряду с этим дается также оценка собираемости и сборности машин.

Коэффициент собираемости характеризует уровень технологии сборки машин на объектах применения и принимается как отношение трудоемкости сборочных работ к сумме трудоемкостей сборочных и пригоночно-доделочных работ, выполняемых при монтаже машины, с целью устранения заводских дефектов.

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_{oi}}{\sum_{i=1}^n T_{oi} + \sum_{i=1}^n T_{ni}}, \quad (7.8)$$

где $\sum_{i=1}^n T_{oi}$ - оперативная трудоемкость основных работ при монтаже

i -ой сборочной единицы объекта, чел.-ч.;

$\sum_{i=1}^n T_{ni}$ - оперативная трудоемкость вспомогательных работ при

монтаже i -ой сборочной единицы объекта, чел.ч.

Коэффициент сборности машины характеризует степень заводской готовности конструкции и определяется как отношение трудоемкости доли сборочных и регулировочных работ по машине, которые производятся на заводе-изготовителе (заводская сборка) к сумме трудоемкостей заводской сборки, а также установочных и регулировочных работ, производимых при монтаже машины.

$$K_{cb} = \frac{T_{зав}}{T_{зав} + T_{сб.м}}, \quad (7.9)$$

где $T_{зав}$ - суммарная трудоемкость заводской сборки объекта на головном предприятии, чел.-ч.;

$T_{сб.м}$ - суммарная трудоемкость сборочных работ при монтаже, чел.-ч.

Значение указанных показателей при периодически проводимых демонтажно-монтажных работах возрастает в силу многократной повторяемости этих работ. К тому же, как правило, возрастает и объем восстановительных работ из-за повреждений элементов оборудования при неординарных транспортировках.

Таким образом, монтажная технологичность является одной из основных характеристик машин и оборудования, в особенности подвергаемых периодическим повторным демонтажно-монтажным работам с транспортированием агрегатов с точки на точку.

Так как монтаж оборудования на объекте применения включает взаимосвязанные работы по сборке и установке изделия в проектное положение, то можно выделить ряд конкретных требований к монтажной технологичности.

Основные из них следующие:

1. *Требование к транспортабельности конструкции.* При проектировании изделий с габаритными размерами, превышающими допускаемые габариты погрузки, требуется предусматривать транспортирование оборудования законченными составными частями.

При повторных демонтажно-монтажных работах, в связи с многократными перевозками оборудования с одной точки на другую, требование к транспортабельности конструкции приобретает особенно важное значение.

2. *Требование к применимости блочного метода монтажа.* Для исключения или снижения объемов домонтажной сборки на точке эксплуатации предусматривается блочный метод монтажа изделия, осуществляемый путем предварительной сборки отдельных узлов, механизмов и машин с целью получения конструктивно законченных частей изделия, устанавливаемых на объекте применения. При периодическом перебазировании оборудования с точки на точку применение блочного метода позволяет не только повысить его транспортабельность, но и ускорить выполнение демонтажа, а после перебазирования оборудования и монтажа на новой точке эксплуатации.

3. *Требование к сборности конструкции.* Это требование связано с оптимизацией степени укрупнения агрегатов и машин на заводе-изготовителе. При определении оптимальной степени сборности исходят из того, что экономически выгодно и технически рационально собирать машину на заводе-изготовителе до такой степени, при которой затраты на изготовление ее на заводе, на перевозку от завода-изготовителя до объекта потребления и на монтаж на объекте применения будут минимальными.

4. *Требование к собираемости конструкции.* Это требование характеризует объем пригоночных и доделочных работ при монтаже, в основном из-за возникших при транспортировании и хранении повреждений составных частей. Указанный объем работ при перио-

дическом демонтаже и монтаже, из-за сложных условий транспортирования оборудования с точки на точку, может возрасти.

5. *Требование к удобству монтажа.* Оценка удобства выполнения работ при монтаже сводится к эргономической оценке конструкций машин. В связи с многократной повторяемостью работ при периодически выполняемом демонтаже-монтаже необходимо учитывать рациональную компоновку мест стыковки и точек обслуживания монтируемых сборочных единиц и агрегатов с тем, чтобы избежать повторяющихся неудобных, утомительных и энергоемких рабочих поз исполнителей.

Монтируемое на новой точке оборудование должно быть приспособлено к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния в процессе монтажа путем технического обслуживания и ремонтов. Наряду с регламентными работами и текущими ремонтами оборудования, производимыми на точке монтажа, должна быть учтена возможность выполнения агрегатно-узловых ремонтов, что позволяет значительно сократить затраты времени на неплановые ремонты в период эксплуатации. Тем самым рассматриваемая монтажная технологичность при периодических повторных демонтажно-монтажных работах охватывает значительную часть структурных составляющих РТ, ЭТ и МТ, начиная с технологичности при подготовке к применению и кончая удобством монтажа.

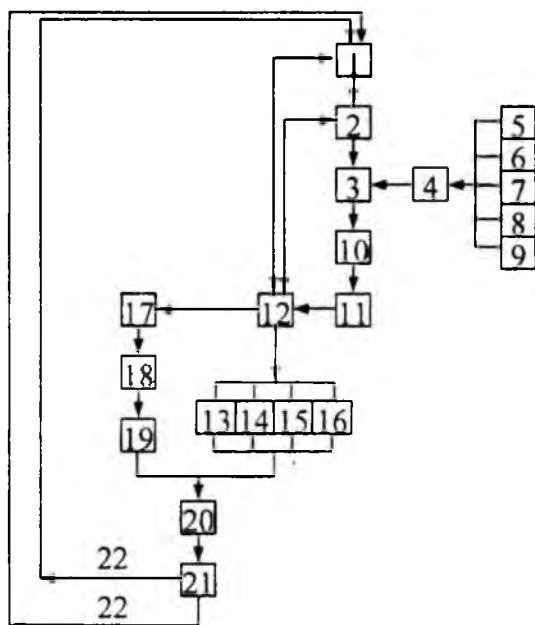
Поэтому, как монтажеригидность, так и монтажную технологичность, также необходимо рассматривать как один из основных факторов, оказывающих влияние на надежность оборудования, и в замкнутом цикле обеспечения эксплуатационной надежности в указанных случаях должны быть также учтены и действия, связанные с периодически повторяющимся их монтажом (рис.7.1).

Как следует из рис.7.1, процесс повышения уровня базовой надежности носит непрерывный и повторяющийся характер за счет повышения качества и модернизации оборудования, что позволяет компенсировать снижение ресурса в процессе эксплуатации. Этот процесс обеспечения и поддержания на необходимом уровне эксплуатационной надежности представляет собой замкнутый цикл, в котором каждое последующее действие связано с предыдущим.

Таким образом, отработка монтажной технологичности конструкции должна не только обеспечить сокращение продолжительности и улучшение качества периодического повторного монтажа машин и агрегатов, но и предусмотреть возможность выполнения требований, предъявляемых к эксплуатационной и ремонтной технологичности. Это позволит не только значительно уменьшить зат-

раты труда и периоды нахождения оборудования в монтаже, но и повысить его надежность до необходимого уровня к началу эксплуатации на новой точке.

Процесс обеспечения эксплуатационной надежности при монтаже оборудования



1 - конструктивные параметры оборудования; 2 - особенности условий эксплуатации; 3 - информация; 4 - средства получения информации; 5 - данные об отказах, обнаруженных при монтаже и демонтаже; 6 - сведения о расходе запасных частей; 7 - сведения о трудоемкости монтажа; 8 - сведения о простоях, связанных с устранением отказов при монтаже; 9 - другие сведения; 10 - обработка информации; 11 - анализ причин отказов и выявление первоочередных задач; 12 - принятие решений об изменении конструкции, технологии изготовления и характера ТО и Р; 13 - изменение конструкции; 14 - изменение технологии изготовления; 15 - изменение технологии монтажа; 16 - изменение практики эксплуатации; 17 - решение о проведении исследований; 18 - результаты исследований; 19 - изменения на основании исследований; 20 - проверка предложений в эксплуатации; 21 - результаты промышленной эксплуатации; 22 - обратная связь.

Рис.7.1.

7.2. Прогнозирование эксплуатационной технологичности

Для прогнозирования эксплуатационной технологичности (ЭТ) нефтепромыслового оборудования наиболее приемлемыми являются методы корреляции и регрессии [32]. Применение этих методов обуславливается характером информации, получаемой в процессе эксплуатации, которая содержит необходимые исходные данные - затраты времени на техническое и обслуживание и текущие ремонты. При применении методов корреляции и регрессии на этапе проектирования, должны быть соблюдены следующие условия: все случайные величины распределены по нормальному закону, все они независимы и являются наиболее характерными переменными факторами, определяющими конечный результат.

При прогнозировании ЭТ объектов с достаточным числом быстроизнашивающихся деталей (например, детали гидравлической части нефтепромысловых и буровых насосов высокого давления), такими факторами могут быть временные показатели: x_1 - время на разборку; x_2 - время на технический контроль и обнаружение отказов; x_3 - время на дефектовку и комплектацию; x_4 - время на сборку.

Каждый из факторов x_1, x_2, x_3, x_4 можно рассматривать как отдельный признак. Корреляционный анализ позволяет выявить влияние этих факторов на результативный фактор (трудоемкость ремонта) y , вместе или порознь, дать количественную оценку и геометрическую интерпретацию.

Исследование по прогнозированию показателей ЭТ оборудования целесообразно проводить в два этапа. Вначале определяется теснота связи исследуемых переменных величин путем анализа парных корреляционных связей между каждым отдельным фактором и различными трудоемкостями, обусловленными этими факторами. На этом этапе выявляются уравнения регрессии, характеризующие функциональные зависимости между математическими ожиданиями случайных величин x и y , определяются коэффициенты регрессии и степень близости статистических зависимостей к функциональным. На втором этапе рассматриваются зависимости, связывающие временные показатели с трудоемкостью текущего ремонта, с условием рассмотрения всех вариантов парных связей результативного фактора y и переменных x_1, x_2, x_3, x_4 , т.е. yx_1, yx_2, yx_3, yx_4 .

Ниже приводятся результаты определения коэффициентов регрессии уравнений, характеризующих связь одного из основных

показателей эксплуатационной технологичности оборудования - трудоемкости текущего ремонта, с временем на разборку, на технический контроль и обнаружение отказов, на дефектовку и комплектацию, на сборку.

В табл.7.1 приведены исходные данные, характеризующие текущие ремонты гидравлической части нефтепромыслового насоса типа Н5-160.

Таблица 7.1

Данные о затратах времени на текущие ремонты гидравлической части нефтепромысловых насосов и трудоемкости ремонтных работ

Номер выбор- ки	Время на разборку, мин (x_1)	Время на технический контроль и обнаруже- ние отказов, мин (x_2)	Время на дефектов- ку и комп- лектацию, мин (x_3)	Время на сборку, мин (x_4)	Трудо- емкость ремонта, чел/мин (y)
1	32	15	12	40	127
2	36	16	14	43	130
3	31	10	13	39	126
4	35	15	15	44	131
5	30	11	11	42	128
6	33	13	13	42	129
7	38	14	15	45	135
8	37	16	16	42	131
9	34	11	11	40	126
10	33	12	13	42	128
Σ	339	133	133	418	1291

Для статистических зависимостей форма связи между одной случайной переменной и условным средним значением другой случайной переменной характеризуется функцией регрессии. Если функция $y=f(x)$ описывается линейным уравнением вида $y=ax+b$, то коэффициенты регрессии (a и b) уравнения определяются методом наименьших квадратов, исходя из обеспечения требования:

$$S = \sum_{i=1}^m (y_i - y)^2 = \min, \quad (7.10)$$

где y_i - фактическое значение зависимой переменной;

y - расчетное значение зависимой переменной;

m - число наблюдений (количество исследуемых объектов).

Подставляя вместо y его значения, находят частные производные функции S по a и b и затем, решая систему полученных уравнений, определяют коэффициенты регрессии:

$$a = (m \sum xy - \sum x \sum y) / (m \sum x^2 - (\sum x)^2); \quad (7.11)$$

$$b = (\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy) / (m \sum x^2 - (\sum x)^2). \quad (7.12)$$

Количественную тесноту связи определяют парным коэффициентом корреляции, который показывает пропорциональность в изменении величин y и x :

$$r_{yx} = (m \sum xy - (\sum x)(\sum y)) / \sqrt{m \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{m \sum y^2 - (\sum y)^2}. \quad (7.13)$$

Коэффициент корреляции характеризует степень приближения зависимости между случайными величинами к линейной функциональной зависимости. Он может иметь как положительное, так и отрицательное значение $(-1 \leq r_{yx} \leq +1)$. Положительное значение этого коэффициента означает, что с увеличением значений x увеличивается и y . Связь между переменными при этом положительная. Отрицательное значение коэффициента показывает, что с увеличением значений x уменьшается y . Если $r_{yx} = 0$, то между признаками y и x отсутствует линейная зависимость, а если $r_{yx} = 1$, то y находится в линейной функциональной зависимости от x .

Достоверность значения коэффициентов корреляции оценивается критерием:

$$\theta_r = |r_{yx}| / \sigma_r, \quad (7.14)$$

где σ_r - среднее квадратическое отклонение коэффициента корреляции.

$$\sigma_r = (1 - r_{yx}^2) / \sqrt{n}. \quad (7.15)$$

При значении критерия $\theta_r > 2,6$ с вероятностью 0,95 можно утверждать о существовании линейной корреляционной связи между анализируемыми параметрами [32].

В табл.7.2 приведены результаты анализа корреляционных связей между результативной величиной - трудоемкостью текущего ремонта насосов (y) и переменными факторами (x_1, x_2, x_3, x_4).

Таблица 7.2

Значения парных коэффициентов корреляции

Показатели процесса и переменных факторов	yx_1	yx_2	yx_3	yx_4
r_{yx}	0,804	0,593	0,771	0,925
σ_r	0,1118	0,2050	0,1283	0,0457
θ_r	7,19	2,89	6,01	20,24

Как видно из табл.7.2, полученные значения критерия θ_r выше критического уровня, что указывает на достоверность полученных коэффициентов корреляции и, что между переменными y и x_1, x_2, x_3, x_4 существует тесная корреляционная связь.

Пользуясь данными табл. 7.1, по формулам (7.11) и (7.12) определены коэффициенты регрессии и получены уравнения линейной регрессии, характеризующие связь трудоемкости ремонта гидравлической части нефтепромыслового насоса с:

- временем на разборку: $y = 100,1 + 0,85x_1$;
- временем на технический контроль: $y = 119,24 + 0,74x_2$;
- временем на дефектовку и комплектацию: $y = 112,44 + 1,25x_3$;
- временем на сборку: $y = 71,96 + 1,37x_4$.

Анализ полученных регрессионных зависимостей трудоемкости ремонта (чел/мин) нефтепромысловых насосов от перечисленных факторов показывает, что доминирующим фактором является время на сборку гидравлической части насосов после ремонта.

Средние значения x и y и среднеквадратические отклонения σ_x и σ_y вычисляются по формулам:

$$\bar{x} = (\sum x_i) / n; \quad \bar{y} = (\sum y_i) / n;$$

$$\sigma_x = \sqrt{(1/(n-1)) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad \sigma_y = \sqrt{(1/(n-1)) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}.$$

Пользуясь данными табл.7.1, находим средние арифметические значения параметров:

$$\bar{x}_1 = 339/10 = 33,9 \text{ мин}; \quad \bar{x}_2 = 133/10 = 13,3 \text{ мин};$$

$$\bar{x}_3 = 133/10 = 13,3 \text{ мин}; \quad \bar{x}_4 = 418/10 = 41,8 \text{ мин};$$

$$\bar{y} = 1291/10 = 129,1 \text{ чел/мин},$$

и их среднеквадратические отклонения:

$$\sigma_{x_1} = 2,19 \text{ мин}; \quad \sigma_{x_2} = 2,21 \text{ мин}; \quad \sigma_{x_3} = 1,70 \text{ мин};$$

$$\sigma_{x_4} = 1,87 \text{ мин}; \quad \sigma_y = 2,77 \text{ чел/мин.}$$

Для получения уравнения множественной регрессии в табл.7.3 приведена корреляционная матрица [32]. Так как расчеты спланированы по методу комбинационного квадрата, то благодаря нейтрализации взаимного влияния факторов, коэффициенты их парной корреляции равны нулю.

Таблица 7.3.

Корреляционная матрица

Факторы	Коэффициенты корреляции					Средние значения	Среднеквадратические отклонения σ
	y	x_1	x_2	x_3	x_4		
y	1	$r_{yx1}=0,804$	$r_{yx2}=0,593$	$r_{yx3}=0,771$	$r_{yx4}=0,925$	129,1	2,77
x_1	-0,804	1	0	0	0	33,9	2,19
x_2	0,593	0	1	0	0	13,3	2,21
x_3	-0,771	0	0	1	0	13,3	1,70
x_4	0,925	0	0	0	1	41,8	1,87

Из табл.7.3 следует, что наибольшее влияние на трудоемкость текущего ремонта оказывает время на сборку гидравлической части нефтепромысловых насосов, а также время на разборку.

По данным табл. 7.3 записывается система уравнений:

$$-2,76 \cdot 0,804 = 2,19a_1 + 0 + 0 + 0;$$

$$2,76 \cdot 0,593 = 0 + 2,21a_2 + 0 + 0;$$

$$-2,76 \cdot 0,771 = 0 + 0 + 1,70a_3 + 0;$$

$$2,76 \cdot 0,925 = 0 + 0 + 0 + 1,87a_4.$$

В результате решения составленной системы уравнений определяются коэффициенты уравнения регрессии:

$$a_1 = -1,015; \quad a_2 = 0,740; \quad a_3 = -1,255; \quad a_4 = 1,366.$$

Параметр a_0 находится согласно уравнению:

$$a_0 = y - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3 - a_4x_4 \quad (7.16)$$

$$a_0 = 129,1 - (-1,015 \cdot 33,9 + 0,740 \cdot 13,3 - 1,255 \cdot 13,3 + 1,366 \cdot 41,8) = 112,6.$$

Уравнение регрессии записывается в виде:

$$y = 112,6 - 1,015x_1 + 0,740x_2 - 1,255x_3 + 1,366x_4. \quad (7.17)$$

Степень соответствия экспериментальных данных и значений, вычисленных по уравнению регрессии, устанавливается на основании меры идентичности

$$\theta(y) = \sum_{i=1}^{\eta} \alpha_i r_{yx} \quad (7.18)$$

где α_i - коэффициенты уравнения регрессии; $\alpha_i = a_i \sigma_{x_i} / \sigma_y$.

По результатам расчетов $\theta(y) = 0,971$. По полученной мере идентичности вычисляется коэффициент множественной корреляции:

$$R_y = \sqrt{\theta(y)} = 0,985. \quad (7.19)$$

Полученное высокое значение R_y характеризует близость экспериментальных данных к линейной модели.

Для оценки возможности улучшения полученной линейной модели (7.17) за счет перехода к нелинейной модели вычисляется корреляционное отношение:

$$\eta_y = (1/\sigma_y) \sqrt{(1/(\eta-1)) \sum_{j=1}^{\eta} (y_{pj} - \bar{y})^2} \quad (7.20)$$

и его критерий надежности:

$$\theta_{\eta} = (\eta \sqrt{n}) / (1 - \eta^2). \quad (7.21)$$

В данном случае $\eta_y = 1,04$, $\theta_{\eta} = 4,9$.

Степень нелинейности модели:

$$m^2 = \eta_y^2 - R_y^2 = 0,11. \quad (7.22)$$

сравнивается с величиной $12/n = 1,2$ и так как $m^2 < 12/n$, то можно считать [32], что переход к нелинейной модели не будет способствовать ее улучшению.

В целом результаты количественной оценки ЭТ подтверждают достаточно высокий уровень эксплуатационной технологичности гидравлической части нефтепромыслового насоса типа Н5-160.

Полученные уравнения регрессии позволяют, с учетом введения определенных корректив, производить в процессе модернизации или проектирования прогнозирование затрат на восстановление рассмотренного объекта исследования.

7.3. Оценка доступности к объектам технического обслуживания и ремонта

Рассмотрим один из основных конструктивно-технологических факторов - доступность к объектам ТО и Р, имеющий исключительно важное значение для сокращения времени и трудовых затрат на проведение профилактических мероприятий и ремонтных работ. Для исследования доступности к деталям и сборочным единицам принята передвижная подъемная установка АЗИНМАШ-43П, предназначенная для подземного ремонта скважин, оборудованных стационарными вышками или мачтами.

Как было выше отмечено, подъемная установка АЗИНМАШ-43П смонтирована на гусеничном тракторе и состоит из следующих основных узлов: четырехскоростной реверсивной коробки передач, однобарабанной лебедки и систем управления. Номинальная грузоподъемность - 280 кН. В данной подъемной установке отбираемая от коробки передач трактора мощность через коробку отбора мощности передается на выводной вал коробки передач типа 4АПТ и далее через открытую зубчатую передачу на вал барабана.

В результате обработки данных об отказах подъемной установки АЗИНМАШ-43П (см. раздел 6) установлено, что из общего числа отмеченных отказов наибольшее их количество приходится на основную лебедку и коробку перемены передач. Из них 29,0% отказов относятся к фрикционной муфте основной лебедки и 22,77% отказов - к ее тормозной системе (без учета тормозной ленты). 28,82% отказов относятся к коробке перемены передач типа 4АПТ. Остальные отказы (19,41%) связаны с пневмо- и электросистемой установки. Низкая безотказность фрикционной муфты лебедки объясняется преждевременными отказами диафрагмы и фрикционных вкладышей муфты (средние наработки на отказ соответственно 2005 и 2954 ч). Большинство отказов коробки перемены передач связаны с усталостным изнашиванием и поломками зубьев цилиндрических и конических зубчатых колес (средняя наработка на отказ 1985...3380 ч) и зубчатой муфты [17].

Основным конструктивно-технологическим недостатком подъемной установки АЗИНМАШ-43П является необходимость предварительного демонтажа основной лебедки для снятия с установки коробки перемены передач с целью устранения отказов. Это отрицательно сказывается на ЭТ и РТ коробки передач. В связи с отмеченным представляет большой интерес оценка наиболее важ-

ного показателя ЭТ и РТ - доступности к восстанавливаемым агрегатам подъемной установки АЗИНМАШ-43П.

Как было отмечено, коэффициент доступности (7.1) определяется с учетом трудоемкости основных и дополнительных демонтижных и разборочных работ, производимых при ТО и Р оборудования.

К дополнительным работам относятся такие, как разборка и демонтаж рядом установленного и не подлежащего в данном случае демонтажу оборудования (снятие ограждений, кожухов, щитов и др.). Основными работами считаются демонтаж подлежащих замене сборочных единиц и деталей, регулировочные, смазочные и другие операции. На основе имеющихся нормативных данных на разборку сборочных единиц и агрегатов нефтепромыслового оборудования в табл.7.4 приведены трудоемкости основных и дополнительных работ, а также расчетные значения коэффициента доступности по основной лебедки и коробке перемены передач (КПП) подъемной установки АЗИНМАШ-43П.

Таблица 7.4.

Данные о трудоемкости демонтажных и разборочных работ агрегатов подъемной установки АЗИНМАШ-43П

Наименование операций	Трудоемкость, чел.-ч			Коэффициент доступности, K_d
	Всего	Основных работ	Дополнительных работ	
Демонтаж основной лебедки с установки (для обеспечения доступа к КПП)	1,12	0,76	0,36	0,678
Демонтаж КПП (с учетом также демонтажа лебедки)	2,28	1,10	1,18	0,482
Демонтаж лебедки с установки и ее разборка	7,00	6,63	0,37	0,947
Собственно демонтаж КПП с установки	1,14	1,10	0,04	0,965
Демонтаж КПП с установки и ее разборка	2,18	2,10	0,08	0,963

Несколько заниженное значение коэффициента доступности для лебедки ($K_d=0,678$) получено из-за больших затрат на дополнительные работы (0,36 чел.-ч), связанных со снятием ограждения барабана, кожухов: тормозной ленты, открытой зубчатой передачи и КПП с установки (без учета демонтажа лебедки); на дополнительные работы (снятие грязевого щитка) затрачивается незначительное время - 0,04 чел.-ч, и коэффициент доступности имеет высокое значение ($K_d=0,965$). Однако, с учетом предварительного демонтажа лебедки трудоемкость дополнительных работ на демонтаж КПП в целом составляет 1,18 чел.-ч (см. табл. 7.4) и коэффициент доступности значительно снижается ($K_d=0,482$). Если же рассматривать демонтаж с установки и разборку указанных агрегатов в отдельности, как самостоятельных объектов, то значения коэффициента доступности имеют удовлетворительные значения: для лебедки $K_d=0,947$; для КПП $K_d=0,963$.

Таким образом, произведенный анализ подтверждает, что основным конструктивно-технологическим недостатком подъемной установки АЗИНМАШ-43П является неудовлетворительная компоновка основной лебедки и КПП, что естественно сказывается на уровне ее ЭТ и РТ.

Указанный недостаток был устранен в подъемной установке ЛПТ-8, созданной взамен установки АЗИНМАШ-43П. Благодаря консольному расположению КПП на лебедочном блоке и индивидуальному ее приводу при помощи карданного вала, решен основной вопрос - значительно улучшен внешний доступ к КПП (без демонтажа лебедки с установки). Решены также вопросы повышения безотказности отдельных деталей и сборочных единиц (см. раздел 6.2.4).

8. Надежность оборудования морских систем сбора, подготовки и транспорта продукции

В настоящее время в широких масштабах ведется разработка нефтяных и газовых месторождений, расположенных в акватории Каспийского моря, часто на значительном расстоянии от берега. Добыча нефти и газа, а также их транспорт осуществляются с помощью систем сбора, подготовки и транспорта продукции (СПТП). Эти системы оснащаются сложным технологическим оборудованием непрерывного действия, содержат трубопроводную арматуру, системы контрольных приборов и автоматики, а также запорные элементы.

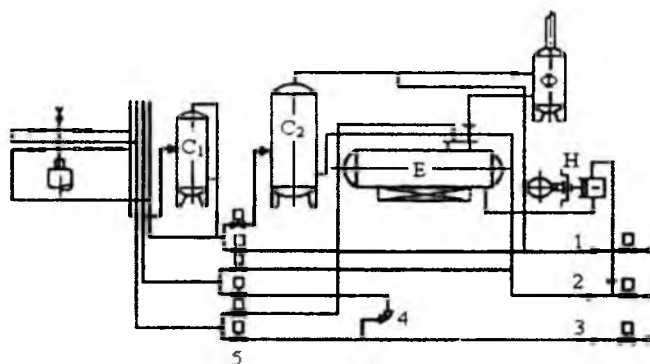
Система СПТП предназначена для сбора продукции скважин, подготовки ее к транспортировке и транспортировки на береговые нефтесборные пункты и газораспределительные станции. Технологическая схема системы СПТП разрабатывается в зависимости от характера месторождений, количества скважин, их параметров (в первую очередь дебита и давления), расстояния от берега [20]. Объектами морской системы СПТП являются технологические установки и системы, устанавливаемые в море на свайных основаниях или призакадных площадках.

Основные объекты морской системы СПТП:

- одиночные скважины;
- морские кустовые платформы (МКП) с группой скважин, осуществляющие сбор и подготовку к транспортировке продукции куста скважин (рис.8.1);
- морские нефтегазосборные пункты (МНГСП), осуществляющие сбор продукции с одиночных скважин и морских кустовых платформ и подготовку ее к транспортировке на берег;
- центральный пункт сбора и подготовки нефти и воды;
- газораспределительная станция;
- нефтегазосборные коллекторы, выкидные линии от одиночных скважин или морских кустовых платформ до МНГСП;
- магистральный нефтепровод до центрального пункта сбора и подготовки нефти и воды;
- магистральный газопровод до газораспределительной станции.

В целях унификации применяемого нефтегазопромыслового оборудования, а также упрощения комплектации и внедрения промышленных методов строительства объекта системы СПТП оснащаются блочным автоматизированным оборудованием для выполнения определенной технологической функции.

Принципиальная схема морской кустовой платформы



C_1 - замерный сепаратор; C_2 - сепаратор газа высокого давления;
 Е - технологическая емкость; Φ - продувочная свеча (факел);
 Н - поршневой насос; 1 - газ высокого давления на транспорт;
 2 - газожидкостная смесь среднего давления на транспорт;
 3 - жидкость низкого давления на транспорт; 4 - штуцер;
 5 - автоматическое запорное устройство.

Рис. 8.1.

Объекты систем сбора, подготовки и транспортировки продукции включают следующие основные узлы и блоки: фонтанную арматуру, устьевой манифольд, технологический блок или автоматическую установку, блок сепараторов, блок входных задвижек, блок выходных задвижек, блок факела сжигания и др. Эти семь блоков связаны единым технологическим процессом. Остальные блоки непосредственно в технологическом процессе не участвуют, а являются вспомогательными, работа которых необходима для нормального функционирования системы или для ликвидации аварийных ситуаций.

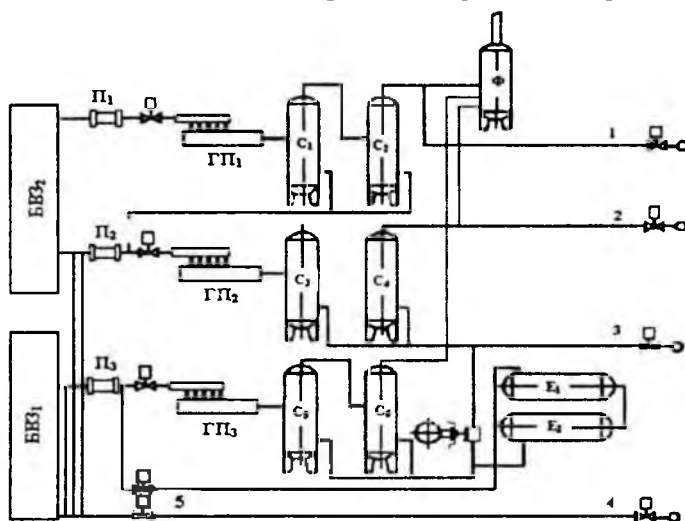
Функционирование системы сбора, подготовки и транспортировки продукции морских месторождений осуществляется по следующей схеме.

Продукция скважин через систему манифольдов поступает на автоматическую замерную установку, состоящую из сепаратора для разделения продукции на газ и жидкость и приборов, измеряющих газовые и жидкостные потоки. Осушенный газ по подводным трубопроводам подается на берег на газораспределительные станции. Жидкость после сепарации собирается в технологические емкости, дожимается насосами до давления, необходимого для транспорти-

ровки ее на берег, и по подводным трубопроводам подается на нефтесборные пункты.

В зависимости от характера месторождения на отдельном основании может буриться одна, две или больше (куст) скважин. В этом случае строится стационарная платформа, называемая морской кустовой платформой (МКП). В зависимости от количества поступающей продукции на морской кустовой платформе может устанавливаться только технологический блок или создаваться система первичной подготовки продукции, состоящая из сепараторов, гасителей пульсации, технологических емкостей, насосов для откачки жидкости и компрессоров для дожатия газа. В первом случае подготовка продукции для транспортировки ее на берег осуществляется в полном объеме на морском нефтегазосборном пункте (МНГСП), а во втором - часть операции по подготовки продукции выполняется на МКП. Принципиальная схема морского нефтегазосборного пункта приведена на рис.8.2.

Принципиальная схема морского нефтегазосборного пункта



БВЗ - блок входных задвижек; П - подогреватель; ГП - гаситель пульсации; С - газосепаратор; Е - технологическая емкость; Н - поршневой насос; Ф - продувочная свеча (факел); 1 - газ высокого давления на транспорт; 2 - газ среднего давления на транспорт; 3 - жидкость на транспорт; 4 - свободная линия (байпас); 5 - автоматическое запорное устройство.

Рис. 8.2.

8.1. Классификация отказов системы СПТП и выбор нормируемых показателей надежности

Учитывая сложные условия эксплуатации оборудования и соответствующих требований, предъявляемых к технологическим системам, при проектировании объектов обустройства морских месторождений нефти и газа в числе прочих технико-экономических показателей необходимо определить показатели надежности функционирования технологических систем и входящего в их состав оборудования.

Отказы технологических установок морских систем СПТП по характеру проявления могут быть сгруппированы следующим образом.

1. Отказы и повреждения, не связанные с нарушением герметичности установок и коммуникаций.

2. Нарушение герметичности с последующей успешной работой устройств противоаварийной автоматики.

3. Нарушение герметичности с последующей неудовлетворительной работой устройств противоаварийной автоматики.

4. Отказ предохранительных устройств или регулирующей автоматики, вызывающий повышение давления сверх установленного в сепараторах, емкостях и трубопроводах.

5. Отказ насосов, откачивающих нефть и жидкость из емкостей и резервуаров.

6. Значительные повреждения оборудования вследствие резкого изменения параметров пласта.

7. Катастрофические повреждения гидротехнических сооружений, стационарных платформ, оснований, вызванные стихийными явлениями (шторм, землетрясение, воздействие ледовых полей, обильный снегопад).

Отказы технологических установок систем СПТП по их последствиям могут быть классифицированы следующим образом.

1. Нарушение непрерывного технологического цикла (сброс жидкостной продукции в резервную емкость с последующей откачкой на берег). К таким последствиям приводят отказы по пункту 1.

2. Ухудшение качества выдаваемой продукции (снижение давления газовых и газожидкостных потоков, смешение в одном трубопроводе осушенного и влажного газов, смешение нефти с конденсатом, промышленными стоками или водой). Характер отказов по пунктам 1, 2, 4.

3. Потеря части продукции (сжигание в факеле газа и нефти). Характер отказов по пунктам 1, 2.

4. Потеря части продукции с выбросом ее в окружающее пространство (выброс несгоревшего газа в атмосферу, утечка нефти, промышленных стоков и пластовой воды в море). Характер отказов по пунктам 3, 4.

5. Аварийное перекрытие скважины (срабатывание отсека-теля на устье скважины). Характер отказов по пунктам 5, 6.

6. Возникновение опасности для жизни обслуживающего персонала (катастрофические повреждения гидротехнических сооружений, стационарных платформ, оснований). Характер отказов по пункту 7.

По конструктивному решению технологическое оборудование подразделяется на ремонтируемое и неремонтируемое. К ремонтируемым объектам относятся такие, у которых утраченная вследствие отказа работоспособность не подлежит восстановлению из-за конструктивных особенностей или экономической нецелесообразности. К таким объектам могут быть отнесены запорные устройства и элементы устройства, автоматики, которые в случае отказа подлежат не восстановлению, а замене.

Рассматриваемые технологические установки представляют собой, как правило, сложные технические системы и относятся к ремонтируемым объектам.

Принципами ограничения длительности эксплуатации оборудования являются отказ и достижение предельного состояния.

До отказа работают, как правило, неремонтируемые объекты, в то время, как ремонтируемые работают до достижения ими предельного состояния.

Критериями достижения предельного состояния объектов общего назначения являются необходимость в проведении очередного капитального ремонта (для основного технологического оборудования и сооружений) и возрастание параметра потока отказов ω выше допустимого уровня (контрольно-измерительные приборы и устройства телемеханики и автоматики).

Критерии наступления предельного состояния объектов, предназначенных для выполнения определенной задачи, устанавливают для режимов ожидания и работы отдельно.

В режиме ожидания критерии наступления предельного состояния те же, что и для объектов общего назначения.

В режиме работы критерием наступления предельного состояния может быть окончание выполнения задачи, если объект

предназначен для однократного выполнения задачи и снижение вероятности безотказной работы в цикле, если объект предназначен для многократного выполнения задачи.

Временной режим использования объектов подразделяется на непрерывный и прерывистый.

Объекты общего назначения в зависимости от потребности в функционировании могут эксплуатироваться в непрерывном или прерывистом режимах. Временной режим работы для таких объектов определяется в зависимости от назначения объекта и характера его резервирования.

Выбор режима осуществляется согласно схеме (рис.8.3). Режим работы системы сбора, подготовки и транспортировки продукции в целом является непрерывным. Поэтому все нерезервированные объекты системы будут работать в непрерывном режиме. Из резервированных объектов в непрерывном режиме будут работать только те, которые имеют ненагруженный резерв. Таким образом, все сепараторы, кроме замерных, подогреватели, гасители пульсации, имеющие нагруженный резерв, работают в непрерывном режиме.

Выбор режима работы объекта системы СПТП



Рис. 8.3.

Различают функциональные и параметрические отказы технологических систем. Функциональным называется отказ, в результате которого система полностью прекращает функционировать. Параметрический отказ - такой отказ, при котором сохраняется функционирование системы, но происходит ухудшение качества продукции на выходе, нарушение технологического процесса или потеря части продукции.

Оценка надежности нефтепромыслового оборудования, отказ которого приводит к функциональному отказу системы, производится с помощью показателей, установленных стандартами (см. раздел 2.2). Для характеристики надежности оборудования, отказ которого приводит к параметрическим отказам системы СПТП (ухудшение качества продукции на выходе системы, загрязнение окружающей среды нефтепродуктами), вводятся дополнительные показатели надежности. Ухудшение качества продукции в результате отказов технологических установок системы СПТП оценивается двумя показателями: получение на выходе системы СПТП некондиционной продукции (в результате смешения жидкостных и газоконденсатных потоков одного давления) и снижение давления продукции (в случае, когда газоконденсатный поток более высокого давления - высокого или среднего - смешивается с потоком более низкого давления - среднего или низкого).

Для оценки надежности технологических установок, отказ которых приводит к ухудшению качества продукции, устанавливаются следующие показатели:

- параметр потока событий ω_Q - появление некондиционной продукции;

- параметр потока событий - снижение давления продукции ω_p ;

Надежность оборудования, отказ которого приводит к нарушению герметичности системы и выбросу в окружающее пространство продукции, может быть охарактеризована с помощью обобщенного показателя - коэффициента защищенности окружающей среды $R(t)$ или показателя $S(t) = 1 - R(t)$ (см. раздел 2.3).

Показатель $R(t)$ представляет собой отношение количества продукции, передаваемой потребителю на выходе системы, к получаемому системой на входе. Для рассматриваемого блочного автоматизированного оборудования величина $R(t)$ достаточно близка к единице, в связи с чем этот показатель не изменяется с изменением надежности.

При отсутствии данных, позволяющих определить коэффициент $R(t)$ или $S(t)$, уровень защищенности окружающей среды, может быть охарактеризован с помощью двух показателей: параметра потока отказов ω_g , вызывающих нарушение герметичности системы, и коэффициента готовности системы

$$K_{гг} = \frac{\mu_g}{\omega_g + \mu_g}, \quad (8.1)$$

где μ_g - интенсивность устранения отказов, вызывающих нарушение герметичности системы.

Окончательный выбор нормируемых показателей надежности производится с учетом следующих факторов:

- особенностей назначения;
- особенностей конструктивного решения;
- принципа ограничения длительности эксплуатации;
- критерия наступления предельного состояния;
- особенностей временного режима использования объекта;
- доминирующего фактора при оценке последствий отказа.

По особенностям назначения технологическое оборудование подразделяется на объекты общего назначения и объекты, предназначенные для выполнения определенной задачи.

К объектам общего назначения относятся: сепараторы, емкости, резервуары, подогреватели, гасители пульсации, линейные участки трубопроводов, т.е. такие технологические установки, в которых процесс выполнения заданных функций допускает перерывы в работе на ремонт или замену. Отказ такого элемента системы вызывает прекращение функционирования только данного элемента на период устранения отказа и в общем случае не приводит к отказу всей системы.

К объектам, предназначенным для выполнения определенной задачи, относятся линейные задвижки, запорные устройства, шаровые краны (отсекатели) и управляющие ими устройства автоматики, а также насосные агрегаты, откачивающие жидкость из технологической емкости и емкостей для сбора промышленных отходов по мере их заполнения. Характер выполняемых такими объектами функций не допускает перерыва в работе до окончания выполнения задания. При этом цикл функционирования состоит из ожидания начала выполнения задачи и собственно работы. Находясь в режиме ожидания, объект постоянно должен быть работоспособным и готовым к включению. Режим ожидания в принципе допускает прове-

дение работ по техническому обслуживанию и ремонту в регламентированных пределах. Уровень надежности таких объектов характеризуется показателем, называемым готовностью срабатывания (см. раздел 2.3).

Вопрос выбора показателей надежности значительно осложняется при расчете надежности не отдельной технологической установки, а объекта системы СПТП или всей системы в целом. Оценка надежности технологической системы производится путем анализа процесса сбора и подготовки к транспортировке продукции по отдельным ее компонентам. Но даже в этом случае отказ отдельных технологических установок системы может привести к последствиям с различными доминирующими факторами, в связи с чем надежность системы должна оцениваться с помощью нескольких показателей, выбранных для оценки надежности входящих в состав данной системы технологических установок.

Аварийные повреждения и отказы технологического оборудования морских месторождений нефти и газа носят стохастический характер, появление которых обусловлено различными случайными факторами. Поток таких повреждений и отказов рассматривается как пуассоновский, т.е. он обладает свойствами отсутствия последствий и ординарности [19].

Анализ надежности функционирования объектов морских систем СПТП производится путем расчленения системы на отдельные элементы и узлы. В качестве элемента системы принимается технологическая установка. Узлом системы считается элемент системы вместе с автоматически управляемым запорным устройством, отсекающим нефте- или газоконденсатный поток в случае отказа элемента. Под отказом данного узла понимается нарушение работоспособности элемента с последующим отказом автоматического запорного устройства.

8.2. Оценка надежности систем сбора и подготовки продукции морских месторождений

Событие B , заключающееся в безотказной работе узла за время t , определяется по формуле логической суммы

$$B = \bigcup_{m=0}^{\infty} A_m,$$

где A_m - событие, состоящее в том, что все элементы работали в течение времени t безотказно или имели m отказов с

успешным срабатыванием каждый раз соответствующего автоматического запорного устройства.

Вероятность безотказной работы узла за время t вычисляется в соответствии с выражением

$$P_{m_0}(t) = P_0(t) + \sum_{m=1}^{\infty} \{q_m(t)[p(\eta=1)]^m\}, \quad (8.2)$$

где $P_0(t)$ - вероятность отсутствия отказов элементов за время t ;

$q_m(t)$ - вероятность того, что за время t произойдет m отказов элементов;

$p(\eta=1)$ - вероятность того, что после отказа элемента происходит успешное восстановление функционирования системы путем отсечения газожидкостных потоков и перехода на резервные элементы.

При пуассоновском потоке отказов элементов вероятность $P_{m_0}(t)$ вычисляется согласно выражению:

$$P_{m_0}(t) = P_0(t)^{[1-p(\eta=1)]}. \quad (8.3)$$

Выражение (8.3) дает возможность рассчитывать вероятность отсутствия выбросов продукции в окружающую среду при эксплуатации любого узла или блока системы СПТП. Таким образом, автоматические запорные устройства существенным образом повышают защищенность окружающей среды. Эффективность применения запорных устройств, проиллюстрирована на рис.8.4.

Зависимость надежности системы от надежности запорных устройств

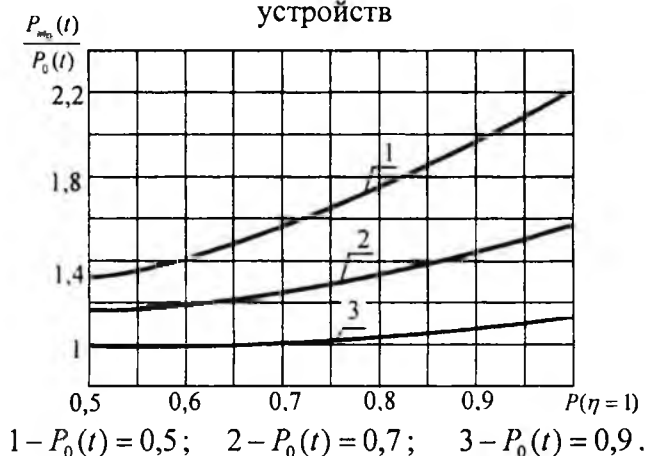


Рис. 8.4.

Как видно, наибольшая эффективность автоматических запорных устройств достигается при условии $P(\eta = 1) > P_0(t)$, т.е. надежность их срабатывания должна быть выше надежности защищаемых ими элементов.

При расчете периодичности профилактического обслуживания систем СПТП и при решении других аналогичных задач применение находит такой показатель надежности как наработка на отказ.

Наработка узла на отказ определяется согласно выражению

$$T_{m_0} = \int_0^{\infty} P_{m_0}(t) dt. \quad (8.4)$$

Подставив значение P_{m_0} из (8.2) в (8.4), получим

$$T_{m_0} = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ [P(\eta = 1)]^m \int_0^{\infty} q_m(t) dt \right\}, \quad (8.5)$$

где T_0 - наработка элемента системы до первого отказа.

При пуассоновском потоке отказов элементов наработка на отказ рассчитывается согласно выражению

$$T_{m_0} = \frac{T_0}{1 - P(\eta = 1)}. \quad (8.6)$$

Таким образом, применение автоматических запорных устройств приводит к возрастанию средней наработки на отказ в

$$\frac{T_{m_0}}{T_0} = \frac{1}{1 - P(\eta = 1)} \text{ раз} \quad (8.7)$$

На рис. 8.5 приведена зависимость, позволяющая сделать заключение о том, что наибольший эффект автоматические запорные устройства дают при $P(\eta = 1) > 0,9$.

Автоматические запорные устройства (отсекатели) относятся к устройствам, предназначенным для выполнения определенной задачи. Они работают в определенных ситуациях (при отказе защищаемых элементов системы СПТП или при открывании и закрывании, обусловленных технологическим режимом), находясь все остальное время в режиме ожидания. Отказ такого типа устройств называется отказом в срабатывании. Под отказом в срабатывании понимается невозможность выполнения устройством технологической операции при возникновении необходимости в ее выполнении (см. раздел 2.3).

Зависимость средней наработки на отказ системы от надежности запорных устройств

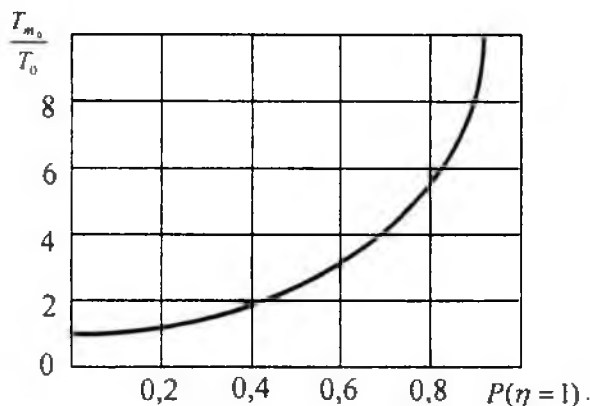


Рис. 8.5.

Отказы в срабатывании автоматических запорных устройств (отсекателей) подразделяются на отказ в срабатывании, который обусловлен отказом устройства, возникшем в режиме ожидания, и на отказ в срабатывании, который обусловлен отказом устройства, возникшим непосредственно в момент срабатывания.

В качестве показателей надежности автоматических запорных устройств принимаются [19]:

- готовность срабатывания $P_1(x)$, представляющая собой вероятность отсутствия отказа в срабатывании устройства при возникновении необходимости в таком срабатывании;

- среднее число срабатываний автоматических запорных устройств $N_{\text{ср}}$, представляющее собой математическое ожидание порядкового номера того отказа защищаемого элемента, при котором наступает отказ в срабатывании автоматического запорного устройства, если при всех предыдущих отказах элемента оно срабатывало.

На стадии нормальной работы устройства, т.е. по истечении приработочного периода, но до наступления предельного состояния, параметр λ_{3y} - интенсивность потока отказов в срабатывании запорных устройств в режиме ожидания, принимается независимым от интервала времени, т.е. поток событий отказа устройства в режиме ожидания принимается простейшим. Вероятность отсутствия отказа в срабатывании запорного устройства в момент срабатывания p_{1y} принимается независимой от количества отказов элементов системы СППП.

Для безотказного функционирования системы и охраны окружающей среды от загрязнения нефтепродуктами необходимо, чтобы после перекрытия поврежденного элемента газожидкостной поток был переведен в резервный элемент путем автоматического открывания соответствующего запорного устройства. Такой переход осуществится успешно только в случае его безотказного срабатывания.

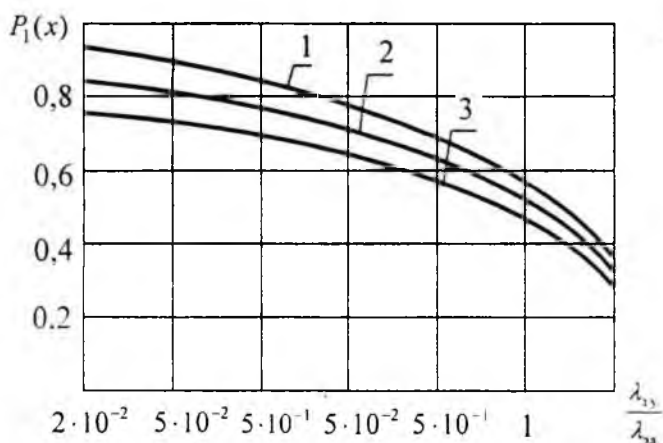
Как было показано выше (см. раздел 2.3), готовность срабатывания определяется согласно выражению

$$P_1(x) = \frac{P_{3,y}}{1 + \frac{\lambda_{3,y}}{\lambda_{3,z}}}, \quad (8.8)$$

где $\lambda_{3,z}$ - интенсивность потока отказов элементов системы СПТП.

Как видно из рис.8.6, готовность срабатывания $P_1(x)$ существенным образом зависит от отношения $\frac{\lambda_{3,y}}{\lambda_{3,z}}$ и убывает при возрастании этого отношения.

Зависимость готовности срабатывания запорных устройств от отношения интенсивности потоков отказов запорного устройства и защищаемого элемента системы



При различных значениях вероятности $P_{3,y}$:
1-0,99; 2-0,95; 3-0,9.

Рис. 8.6.

Для поддержания высокого уровня надежности запорного устройства необходимо, чтобы интенсивность отказов в режиме ожидания запорного устройства λ_{zy} была значительно меньше интенсивности отказов защищаемых элементов системы, т.е. $\lambda_{zy} \ll \lambda_{зл}$. При соизмеримых величинах λ_{zy} и $\lambda_{зл}$ даже очень высокое значение вероятности p_{zy} ($p_{zy} \approx 1$) дает низкую результирующую надежность $P_1(x)$, которая в этом случае почти не зависит от p_{zy} .

Так, при $\lambda_{zy} = \lambda_{зл}$ возрастание p_{zy} от 0,8 до 0,99 приводит к увеличению $P_1(x)$ от 0,4 до 0,5. Наоборот, при $\lambda_{zy} / \lambda_{зл} \ll 1$ величина $P_1(x)$ почти не зависит от этого отношения и определяется только значением p_{zy} . Так увеличение отношения $\lambda_{zy} / \lambda_{зл}$ в 2,5 раза (с $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$) при $p_{zy} = 0,99$ приводит к незначительному уменьшению вероятности $P_1(x)$ (с 0,97 до 0,94).

Проблема охраны окружающей среды должна быть увязана с бесперебойной работой скважин и системы СПТП в целом. Поэтому необходимо также рассмотреть вопрос о надежности функционирования системы. После того, как повреждение элемента системы СПТП привело к срабатыванию на закрытие запорного устройства, автоматически или вручную должен быть осуществлен переход на резервную линию путем открывания соответствующего запорного устройства. Такой переход осуществляется успешно лишь в случае безотказного срабатывания этого запорного устройства. Готовность срабатывания запорного устройства резервного элемента $P_1(y)$ рассчитывается по выражению, аналогичному (8.8).

Вероятность же резервированной системы $P_1(z)$ зависит от многих параметров, значения которых зачастую неизвестны и требуют для своего определения специальных экспериментов. Это обстоятельство вызывает затруднения при вычислении вероятности $P_1(z)$.

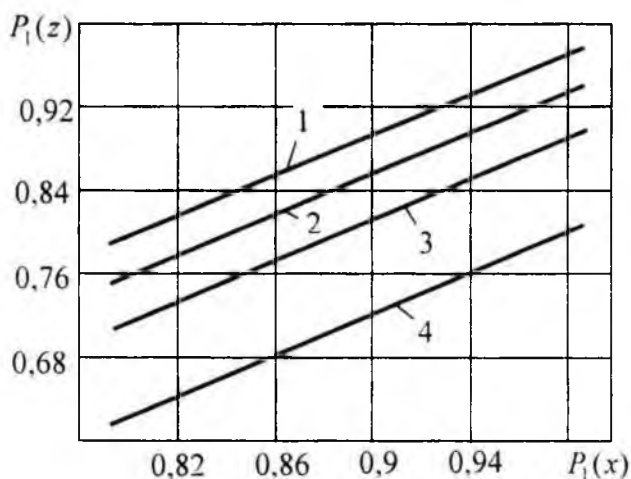
В целях упрощения расчетов приближенно можно принять, что

$$P_1(z) \approx P_1(x) \cdot P_1(y). \quad (8.9)$$

Допускаемая от такого приближения абсолютная ошибка определяется величиной $|\Delta| = \frac{\lambda_{zy} \lambda_{pz}}{\lambda_{зл}}$ и в большинстве случаев не

превышает 0,001 (здесь $\lambda_{p,z}$ - интенсивность потока отказов в срабатывании резервных запорных устройств в режиме ожидания). На рис. 8.7 приведена зависимость $P_1(z) = f[P_1(x), P_1(y)]$, вычисленная в диапазоне наиболее вероятных значений готовности срабатывания 0,8-0,99. Как видно, в первом приближении зависимость вероятности $P_1(z)$ от готовности срабатывания запорных устройств является прямолинейной.

Зависимость результирующей эффективности запорных устройств
от готовности срабатывания $P_1(x)$



при $P_1(y)=0,99$ (кривая 1); $P_1(y)=0,95$ (кривая 2);
 $P_1(y)=0,9$ (кривая 3); $P_1(y)=0,8$ (кривая 4).

Рис. 8.7.

Итак, выше были сформулированы требования к надежности запорных устройств и защищаемых ими элементов, а также рассмотрен вопрос о координации этой надежности с тем, чтобы ограничить до минимума выбросы продукции в окружающую среду. Показано, что бесперебойное функционирование системы СПТП и охрана окружающей среды от загрязнения нефтепродуктами могут быть обеспечены безотказной работой автоматических запорных устройств, установленных на рабочих и резервных элементах системы.

8.3. Расчет надежности системы СПТП на стадии проектирования

Морская система сбора, подготовки и транспортировки нефти и газа, в процессе функционирования, в результате параметрических или функциональных отказов, может находиться в одном из следующих состояний:

- полной исправности - в системе отсутствуют поврежденные элементы, она полностью исправна и работоспособна;
- полной работоспособности - в системе имеются отказавшие элементы, требующие замены или ремонта, но не влияющие на качество и количество вырабатываемой продукции;
- частичной работоспособности - параметрический отказ технологической системы, приводящей к одному или нескольким перечисленным выше последствиям (особое место в них занимают отказы, приводящие к выбросу продукции в окружающую среду);
- полной неработоспособности - функциональный отказ технологической системы, вызванный отказами элементов, создающими опасность для оборудования и обслуживающего персонала и требующими перекрытия скважин; такого рода отказы полностью нарушают технологический режим и могут привести к разрушению оборудования, травматизму персонала и потере скважины.

Оценка надежности функционирования системы СПТП производится пооперационно, т.е. путем анализа процесса сбора и подготовки к транспортировке каждого компонента продукции в отдельности (газ высокого давления, газ среднего давления, жидкость и газ низкого давления и т.д.). Также в отдельности рассматривается надежность функционирования всех вспомогательных технологических установок и установок, не связанных технологически с процессом сбора и подготовки продукции (блок топлива и метанола, блок подготовки воздуха для устройств КИП и автоматики, блок сбора промышленных стоков, блок подготовки газа для пневмоприводов).

С целью расчета надежности вышеупомянутых систем для последних на основе функциональных схем составляют структурные схемы. Всю исследуемую систему разбивают на элементы с учетом следующих требований:

- каждый элемент схемы является самостоятельным в функциональном или конструктивном плане;

- каждый элемент лимитирует надежность; отказ элемента приводит к частичному или полному отказу всей системы или к выбросу продукции в окружающую среду;

- в качестве элементов схемы рассматриваются технологические установки, соединяющие их коммуникации (трубопроводы), а также устройства автоматики и управляемые ими запорные устройства (задвижки, отсекатели), выполняющие защитную функцию;

- отказы различных элементов, входящих в структурную схему надежности, случайны и независимы, т.е. система прекращает функционирование из-за того, что произошел один отказ.

Способ соединения элементов в расчетной схеме надежности учитывает конструктивные особенности системы, отсутствие или наличие резервирования элементов и вид резерва по нагруженности. При этом следует руководствоваться следующими основными правилами:

- два соседних элемента соединяются последовательно, если отказ одного из них приводит к отказу системы, или параллельно, если отказ системы наступает только после отказа обоих элементов;

- если для отключения поврежденного элемента или блока, или для включения в работу резервного требуется срабатывание нескольких автоматических запорных устройств (отсекателей), то в структурную схему эти запорные устройства (отсекатели) включаются как последовательные элементы.

Структурные схемы технологических систем сбора и подготовки к транспортировке отдельных компонентов продукции составляются для нормальных и аварийных режимов работы. В качестве нормального режима принимается такой режим, при котором продукция поступает в приемную систему с заданными показателями качества. При анализе нормального режима работы учитываются и отказы элементов системы, но только такие, которые не влияют на конечный выход продукции (отказ элементов системы, работающих с резервом). Аварийным считается режим, при котором продукция поступает в приемную систему в меньшем количестве, или качество поступающей продукции не соответствует установленным нормам, или продукция не поступает в приемную систему. Согласно классификации отказов к аварийному режиму приводят параметрические отказы технологических установок, вызывающие нарушение технологического процесса, ухудшение качества продукции, потерю части продукции или полное перекрытие скважины.

Все перечисленные аварийные режимы являются заранее предусмотренными для различных ситуаций, возникающих при

отказах тех или иных элементов системы. Переход к этим режимам осуществляется в результате правильной и безотказной работы устройств автоматики и управляемых ими запорных устройств (отсекателей), выполняющих функцию защиты технологических установок и окружающей среды от загрязнения нефтепродуктами. В случае отказа устройств автоматики может произойти выброс продукции в окружающую среду, что недопустимо. Поэтому необходимо предусмотреть телеконтроль исправности устройств автоматики и запорных устройств (отсекателей), перекрывающих газожидкостные потоки при нарушении герметичности коммуникаций.

Устройства автоматики, осуществляющие защиту технологических установок от повреждений и окружающей среды от загрязнения, реагируют на понижение давления в системе, вызванное, как правило, нарушением его герметичности (разрывы, пропуски в системе вследствие изменений прочностных характеристик, а также разъединений абразивными и корродирующими включениями транспортируемой среды), и на повышение давления (сужение или перекрытие проходного сечения вследствие отложения парафина, гидратообразования или пескопроявления), чреватое угрозой разрыва коммуникаций.

Схема работы автоматики в обоих случаях одинакова - перекрытие газожидкостного потока повышенного или пониженного давления и перепуск потока в резервную емкость или на сжигание в факеле. Исключение составляют такие повреждения элементов системы, которые делают невозможным перепуск продукции в резервные элементы (вследствие их повреждения или отсутствия). В этом случае скважину перекрывают.

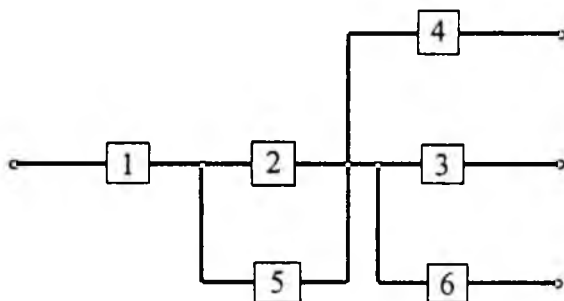
В общем случае схема функционирования объектов системы СПТП при сборе и подготовке к транспортировке отдельных компонентов представлена на рис. 8.8 (газ высокого и среднего давления) и на рис. 8.9 (жидкость среднего и низкого давления). Условно обозначенные номерами элементы (технологические установки) системы могут быть одиночными или с резервом. Под отказом такого элемента понимается невозможность его функционирования в результате выхода из строя рабочего агрегата или рабочего и резервного агрегатов одновременно (в зависимости от схемы).

Нормальное функционирование системы сбора и подготовки к транспортировке газа высокого и среднего давления осуществляется при работе элементов 1, 2 и 3 (рис. 8.8).

При отказе сепараторной установки 2 (параметрический отказ технологической системы) газожидкостный поток высокого дав-

ления (ВД), или среднего давления (СД) без разделения на газ и жидкость отводится по байпасу 5. В результате ухудшается качество продукции на выходе системы.

Типовая структурная схема сбора и подготовки газа



1 - входной коллектор (с блоком задвижек); 2 - газосепаратор с подогревателем; 3 - выходной коллектор газа; 4 - продувочная свеча (факельная установка); 5 - обводной коллектор (байпас) газожидкостной смеси; 6 - резервный выходной коллектор.

Рис. 8.8.

При отказе выходного коллектора 3 газа ВД (СД) он подается временно на факел 4 и осуществляется перевод газа ВД (СД) на резервный выходной коллектор ВД (СД) или перепускается через штуцер в выходной коллектор 6 газа СД (НД).

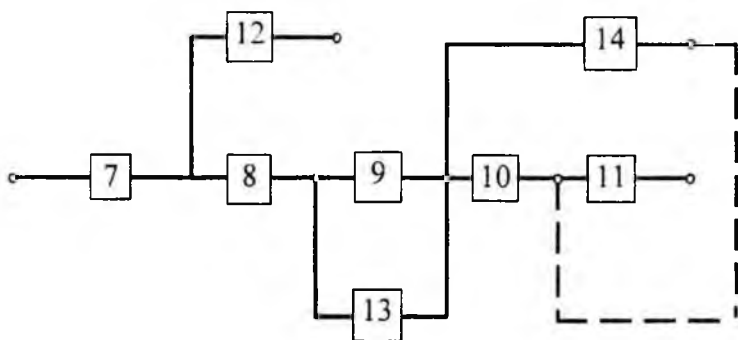
В результате в первом случае теряется часть продукции, а во втором - ухудшается качество продукции на выходе системы (давление падает).

Загрязнение окружающей среды происходит при повреждениях емкостей, сепараторов и трубопроводов, приводящих к нарушению герметичности этих установок и отказам противоаварийной автоматики или управляемых ею задвижек на закрытие.

Причем такое стечение обстоятельств не следует считать нарушением ординарности потока отказов, т.е. одновременным возникновением двух отказов, так как отказ устройств автоматики или задвижек может наступить в режиме ожидания, т.е. раньше, чем наступил отказ защищаемого ими оборудования, или в момент срабатывания в результате возмущений, вызванных перекрытием газовых потоков ВД и переводом их в резервные линии.

Нормальное функционирование системы сбора и подготовки к транспортировке жидкости осуществляется при работе элементов 7, 8, 9, 10, 11 (см.рис. 8.9). При отказе сепаратора СД (подогревателя, гасителя пульсации, поз.8) газожидкостный поток без разделения на газ и жидкость отводится по байпасу 12 и далее на выходной коллектор СД. В результате ухудшается качество продукции на выходе.

Типовая структурная схема сбора и подготовки жидкости



1, 2, 3, 4, 5, 6 - см. рис.8.8; 7 - входной коллектор среднего давления с блоком задвижек; 8 - газосепаратор среднего давления с подогревателем и гасителем пульсации; 9 - сепаратор с подогревателем низкого давления; 10 - насос для откачки жидкости; 11 - выходной коллектор жидкости; 12 - обводной коллектор (байпас) газожидкостной смеси среднего давления с выходным коллектором среднего давления; 13 - обводной коллектор (байпас) газожидкостной смеси низкого давления; 14 - резервная емкость с насосом.

Рис. 8.9.

При отказе сепаратора (или подогревателя) НД газожидкостный поток отводится по байпасу 13. Вследствие отказа ухудшается качество продукции на выходе.

При отказе выходного коллектора жидкости 11 жидкость подается самотеком в резервную емкость 14, откуда с помощью насосов откачивается в жидкостный коллектор 11 (после его восстановления) или в резервный коллектор.

Последствием отказа является нарушение технологического процесса.

Механизм загрязнения окружающей среды такой же, как и в технологическом процессе сбора и подготовки газа.

Объекты системы сбора, подготовки и транспортировки продукции морских месторождений состоят из ряда самостоятельных блоков (блочных автоматизированных технологических установок). При расчете надежности функционирования такого объекта вначале рассматриваются установки и блоки, связанные общим технологическим процессом, а затем оценивается надежность вспомогательных установок и блоков, необходимых для нормального функционирования системы СПТП.

К вспомогательным относятся: блок топлива и метанола; блок сбора промстоков; блок подготовки воздуха для приборов КИП и автоматики; блок подготовки газа для пневмоприводов; блок баллонов инертного газа.

Любой из этих блоков состоит из определенного количества узлов, каждый из которых включает в себя элемент системы и автоматическое запорное устройство, прекращающее подачу продукции в данный элемент в случае его отказа. Поэтому при оценке надежности такого блока показатели надежности вычисляются как результирующие для всего блока.

Под блоком в общем случае понимается функционально связанная группа элементов, имеющая общее запорное устройство (электрозадвижку, отсекабель) с r резервом элементов и l резервом запорных устройств. Показатели надежности i -го узла вычисляются в зависимости от схемы включения и количества рабочих и резервных элементов.

Вероятность безотказной работы такого узла, представляющего систему с резервом с возможностью восстановления и переключателем нагрузки с рабочего на резервный элемент, вычисляется согласно выражению:

$$P_i(t) \approx \exp\{-[\Lambda_{\text{рез}} + (m - r)\Lambda_n]\}t, \quad (8.10)$$

где $\Lambda_{\text{рез}}$ - интенсивность отказов резервированного элемента системы;

Λ_n - параметр потока отказов переключателя;

m - общее количество элементов;

r - количество резервных элементов

Переключатель - это комплект автоматических устройств, осуществляющих перевод продукции с отказавшего на резервный элемент.

Для дублированной системы $\Lambda_{рез}$ определяется:

$$\Lambda_{рез} = \frac{\omega_{эл}^2}{\mu} - \text{для ненагруженного резерва};$$

$$\Lambda_{рез} = \frac{2\omega_{эл}^2}{\mu} - \text{для нагруженного резерва};$$

$$\Lambda_{п} = \omega_{эл}[1 - P(\eta = 1)];$$

$\omega_{эл}$ - параметр потока отказов элементов системы;

μ - интенсивность восстановления переключателя.

Вероятность $P(\eta = 1)$, характеризующая результирующую надёжность функционирования системы автоматических запорных устройств, вычисляется в зависимости от количества этих устройств, установленных для защиты i -го узла. Так, в зависимости от технологической схемы, автоматические запорные устройства (отсекатели) могут быть установлены на входе и выходе газожидкостных потоков (для предотвращения обратного тока в случае нарушения герметичности в i -м узле) или только на входе.

Если рассматриваемому элементу или группе элементов i -го узла предшествует l_i последовательно соединенных запорных устройств, то надежность системы автоматических запорных устройств будет вычисляться согласно выражению:

$$P_i(\eta = 1) = 1 - [1 - P_{0i}(\eta = 1)]^{l_i}. \quad (8.11)$$

Если же при нарушении герметичности (повреждении) элемента в i -м узле требуется перекрытие нескольких коммуникаций и, следовательно, работа нескольких автоматических запорных устройств, то результирующая надежность такой системы вычисляется согласно выражению:

$$P_i(\eta = 1) = [P_{0i}(\eta = 1)]^{l_i}, \quad (8.12)$$

где $P_{0i}(\eta = 1)$ - надежность автоматического запорного устройства, которая вычисляется в зависимости от способа резервирования элементов системы.

Если в случае повреждения (нарушения герметичности) рабочего элемента требуется только перекрытие потока продукции (случай нагруженного резервирования), то вероятность $P_{0i}(\eta = 1) = P_1(x)$.

Если наряду с перекрытием потока в поврежденной коммуникации требуется перевод его в резервную (случай ненагруженного резервирования), то вероятность

$$P_{0i}(\eta = 1) = P_1(x).$$

При анализе функционирования схем объектов системы СПТП в некоторых аварийных режимах объект рассматривается как система, рабочие и резервные элементы которой имеют различные показатели надежности. Так, при отказе блока сепараторов свободная линия, по которой перепускается газожидкостная смесь, является своеобразным резервом для сепаратора и обладает иными показателями надежности. Аналогично, система резервуаров и емкостей с насосами для откачки жидкости представляет резерв для подводного трубопровода, по которому осуществляется транспортировка жидкости на берег и т.д. Показатели надежности такой системы будут следующие:

наработка на отказ

$$T_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \mu_i \prod_{j=1}^m \gamma_j}; \quad (8.13)$$

вероятность безотказной работы за время t

$$P(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \prod_{j=1}^m \gamma_j\right); \quad (8.14)$$

коэффициент технического использования

$$K_{т.и} = 1 - \prod_{j=1}^m \gamma_j, \quad (8.15)$$

где $\gamma_j = \frac{\omega_g}{\mu_i}$ и $\gamma_j = \frac{\omega_g}{\mu_a + \mu_{np}}$ - общее количество элементов (рабочих и резервных);

ω_g - параметр потока отказов;

μ_a - интенсивность восстановления при аварийном отказе;

μ_{np} - интенсивность восстановления при профилактическом обслуживании.

Оценка степени защищенности окружающей среды от загрязнения нефтепродуктами вследствие отказов элементов системы СПТП осуществляется с помощью коэффициента загрязнения окружающей среды $S(t)$, который вычисляется согласно выражению [6]

$$S(t) = \sum_{i=1}^k S_i(t) = \sum_{i=1}^k Z_i t_{n_i} M(m_i)_t, \quad (8.16)$$

где Z_i - отношение количества продукции, выбрасываемой в окружающую среду при нарушении герметичности i -ой технологической установки, к количеству передаваемой продукции;

t_{ni} - время, необходимое для перекрытия i -го потока продукции вручную в случае отказа автоматики;

T - наработка на отказ технологической установки, вызывающий нарушение герметичности системы;

$M(m_i)_i$ - математическое ожидание количества случаев выброса продукции в окружающую среду вследствие нарушения герметичности i -ой технологической установки в течение заданного времени

Суммирование производится по всем блочным автоматизированным технологическим установкам, входящим в состав системы СПТП.

В качестве примера, ниже приводится выбор и расчет показателей надежности выполнения технологической операции сбора, и подготовки газа на морской кустовой платформе (см.рис.8.1). Исходными данными для расчета показателей надежности являются: принципиальная (технологическая) схема сбора, подготовки и транспортировки продукции, регламент ремонтов и показатели надежности технологических установок и устройств, входящих в состав объектов системы СПТП.

Расчет показателей надежности производится за годовой цикл эксплуатации с учетом времени плановых ремонтов. Рассматривается период нормальной эксплуатации (т.е. по окончании приработочного периода), при условии соблюдения требований к монтажу оборудования и регламента проведения профилактического обслуживания.

При выборе нормируемых показателей надежности рассматриваются технологические установки, которые используются в процессе сбора и подготовки газа (высокого или среднего давления). Эти установки являются объектами общего назначения с непрерывным временным режимом использования, ограничением длительности эксплуатации до предельного состояния и восстановлением путем капитального ремонта. При этом доминирующими факторами последствий отказа могут являться: вынужденный простой; ухудшение качества продукции и простой; нарушение герметичности и простой; отказ.

В связи с этим выбираются следующие показатели надежности [19]:

$K_{\text{ти}}$ - коэффициент технического использования;

Ω_Q - параметр потока событий, состоящих из появления некондиционной продукции;

$S(t)$ - коэффициент загрязнения окружающей среды (или параметр потока отказов ω_g и коэффициент готовности K_r).

При составлении расчетной (структурной) схемы надежности, система разбивается на элементы согласно приведенным выше рекомендациям.

Данная методика расчета надежности, установленного на стационарных платформах технологического оборудования, позволяет оценить показатели надежности при эксплуатации оборудования в специфических условиях моря с учетом качества его функционирования, безопасности эксплуатации и охраны окружающей среды от загрязнения нефтепродуктами.

Настоящая методика может быть использована специалистами, занимающимися проектированием морских систем сбора, подготовки и транспортировки продукции и позволяет:

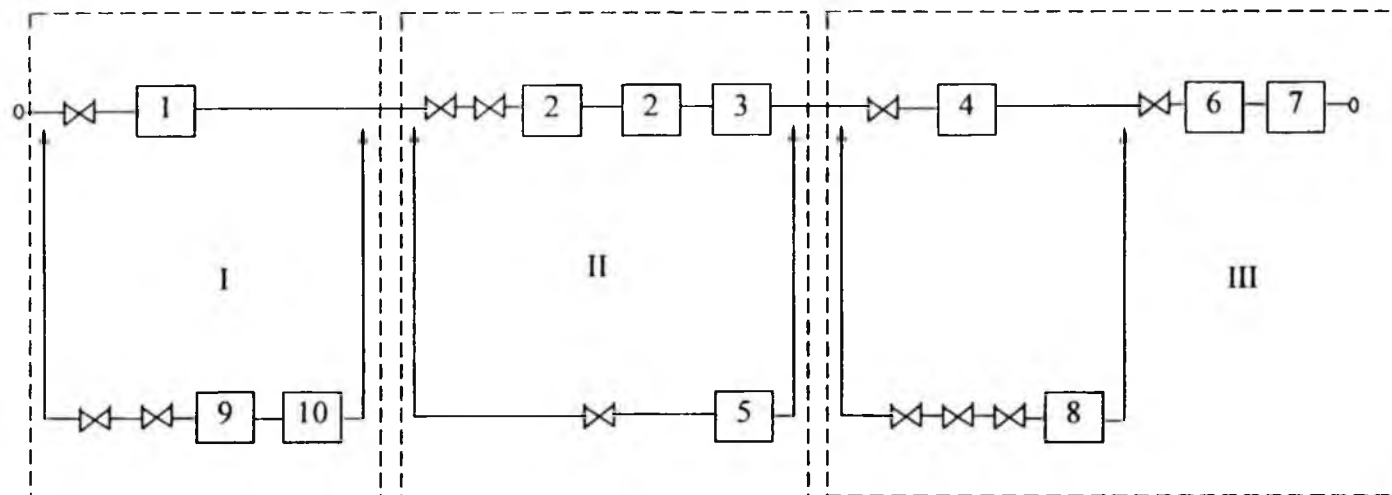
- выбрать вид нормируемых показателей надежности блочного технологического оборудования;
- оценить надежность функционирования технологического оборудования;
- оценить надежность автоматических запорных устройств;
- рассчитать надежность морских систем сбора, подготовки и транспортировки продукции.

8.4. Пример расчета надежности технологической системы

Рассматриваемая технологическая система состоит из 10 элементов, лимитирующих надежность. Структурная схема для расчета надежности технологического процесса сбора и подготовки газа представлена на рис. 8.10.

Структурная схема, приведенная на рис.8.10, предназначена для расчета надежности функционирования системы в нормальном и аварийном режимах. Функционирование системы состоит в следующем.

Структурная схема для расчета надежности системы сбора и подготовки газа высокого давления



1 - входной коллектор газа высокого давления с линией на сепарацию; 2 - сепаратор газа высокого давления; 3 - линия газа высокого давления; 4 - подводный коллектор газа высокого давления; 5 - байпас высокого давления; 6 - линия сброса газа высокого давления на факел; 7 - факел с насосом для откачки промышленных стоков; 8 - коллектор газожидкостной смеси среднего давления на МНГСП; 9 - замерный коллектор; 10 - замерный газосепаратор

Рис. 8.10.

Нормальный режим. Газожидкостная смесь от скважины подается по сборному коллектору газа 1 (см. рис.8.10) на газосепараторы 2 и затем в линию газа 3 и далее в подводный газопровод на МНГСП.

Отказы, не влияющие на конечный выход продукции: отказ коллектора газа ВД; отказ одного газосепаратора; повреждение подводного газопровода ВД.

В случае отказа коллектора ВД 1 газожидкостная смесь ВД поступает в замерный коллектор 9 и далее - на замерный сепаратор 10, откуда на вход газосепаратора ВД 2. При отказе одного газосепаратора осушку газа осуществляет оставшийся в работе. При отказе подводного коллектора газа ВД 4, газ ВД переводится в коллектор СД 8, газожидкостная смесь СД переводится в коллектор НД 13 (см. рис.8.10), а газожидкостная смесь НД – в продувочную емкость.

Аварийный режим. При отказе газосепаратора 2 или линии газа ВД 3 газожидкостная смесь ВД через байпас ВД 5 подается на подводный коллектор газа ВД 4 (подача некондиционной продукции ВД).

При отказе подводного коллектора газа ВД газ или газожидкостная смесь ВД подается через штуцер в подводный газопровод СД 8 (подача некондиционной продукции меньшего давления).

Исходные данные по надежности элементов рассматриваемой системы приведены в табл.8.1.

Коэффициент технического использования системы вычисляется по выражению

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{вд}}}{T_{\text{вд}} + \tau_{\text{пр вд}} + \tau_{\text{в вд}}} \quad (8.17)$$

где $T_{\text{вд}}$ - наработка системы на отказ;

$\tau_{\text{пр вд}}$ - время простоя в профилактическом ремонте;

$\tau_{\text{в вд}}$ - время восстановления работоспособности при аварийном отказе.

Для вычисления показателей: средней наработки на отказ $\bar{T}$ и среднего времени восстановления $\bar{\tau}_в$ для всей системы структурная схема на рис.8.10 разбивается на три группы. Вычисляются соответствующие показатели для отдельных групп, а затем для всей системы.

Надежность автоматических запорных устройств, осуществляющих перекрытие поврежденных элементов и открытие резервных, характеризуется показателями $P_1(x)$ и $P_1(y)$.

По первой группе получены следующие значения:

1. Нарботка на отказ элементов (9) и (10), а также (1) (см. табл.8.1)

Таблица 8.1.

Исходные данные для расчета надежности рассматриваемой системы [19]

Наименование элементов структурной схемы системы	Показатели надежности	
	Нарботка на отказ T , ч	Среднее время восстановления $\bar{t}_в$, ч
Коллектор газа ВД	$\frac{3000}{12000}$	25
Сепаратор газа ВД	$\frac{3500}{15000}$	8
Линия газа ВД	$\frac{3000}{12000}$	25
Подводный газопровод ВД	$\frac{2000}{10000}$	20
Обводная линия (байпас) ВД	3000	25
Линия сброса газа на факел	$\frac{8000}{20000}$	20
Продувочная свеча (факел)	$\frac{5000}{15000}$	20
Подводный газопровод СД	2000	20
Замерный коллектор	3000	25
Замерный газосепаратор	3500	8
Примечания: 1. Время прстоя в плановом (профилактическом) ремонте 60 ч. 2. В числителе приводится общая наработка на отказ, в знаменателе - наработка на отказ, вызывающий нарушение герметичности.		

$$T_{9-10} = \frac{1}{1/T_9 + 1/T_{10}} = 1640 \text{ ч}; \quad T_1 = 3000 \text{ ч.}$$

2. Время восстановления работоспособности при отказах элементов (9) и (10)

$$\tau_{в9-10} = T_{9-10} (\tau_{в9}/T_9 + \tau_{в10}/T_{10}) = 17,4 \text{ ч.}$$

3. Вероятность безотказной работы замерного коллектора (9) и газосепаратора (10)

$$P_{l(9-10)}(\eta=1) = P_1(x) \cdot P_1^2(y) = 0,97.$$

4. Нарботка на отказ элементов первой группы

$$T_{1г} = \frac{T_1}{(\tau_{в1} + \tau_{в(9-10)})/T_{9-10} + [1 - P_{l(9-10)}(\eta=1)]} = 64,06 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

5. Вероятность восстановления работоспособности при отказах элементов первой группы

$$\tau_{в1г} = \frac{1}{1/\tau_{в1} + 1/\tau_{в(9-10)}} = 10,2 \text{ ч.}$$

Аналогично вычисляются показатели для второй и третьей групп:

$$T_{2г} = 25,5 \cdot 10^3 \text{ ч}, \quad \tau_{в2г} = 10,2 \text{ ч.}$$

$$T_{3г} = 1,78 \cdot 10^3 \text{ ч}, \quad \tau_{в3г} = 12,2 \text{ ч.}$$

Резльтирующие показатели:
наработка на отказ всей системы

$$T_{вд} = \frac{1}{1/T_{1г} + 1/T_{2г} + 1/T_{3г}} = 1615 \text{ ч};$$

время восстановления работоспособности системы

$$\tau_{вд} = T_{вд} \left(\frac{\tau_{в1г}}{T_{1г}} + \frac{\tau_{в2г}}{T_{2г}} + \frac{\tau_{в3г}}{T_{3г}} \right) = 12 \text{ ч};$$

время простоя в профилактическом ремонте $\tau_{пр.вд} = 60 \text{ ч.}$

Коэффициент технического использования

$$K_{ти} = \frac{T_{вд}}{T_{вд} + \tau_{пр.вд} + \tau_{вд}} = 0,957.$$

При расчете параметра потока отказов Ω_Q принимается во внимание, что появление некондиционной продукции возможно при отказе газосепараторов ВД (2) и линии газа ВД (3) (см. рис.8.10). Следовательно,

9. Обеспечение работоспособности оборудования в установившихся условиях эксплуатации

Анализ причин отказов многих видов оборудования показывает, что для большинства из них критерием, определяющим ресурс отдельных деталей, является изменение их рабочих характеристик по причине износа.

Повышенный износ деталей в одних случаях нарушает нормальное их взаимодействие, в других - приводит к потере кинематической точности механизмов, в третьих - нарушает герметичность сочленений. В результате износа понижается мощность двигателей, увеличивается расход горючесмазочных материалов, падает производительность машин.

Исследование механизма и характера изнашивания взаимодействующих поверхностей деталей показывает, что отказ их, а следовательно, и их ресурс, связан со сложными процессами, зависящими от режимов трения, среды, состояния рабочих поверхностей деталей и ряда других факторов. В результате имеет место значительное рассеивание наработок до отказа деталей и сборочных единиц, что оказывает влияние на межремонтный период, а также на периодичность проведения планового (регламентированного) технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР).

В табл.9.1 и на рис.9.1 [21] в качестве примера приведены данные о безотказности деталей и кривые плотностей распределения наработок до отказа деталей коробок передач и фрикционной муфты подъемных установок АЗИНМАШ-43А и АЗИНМАШ-43П (без выщечного сооружения). Полученные высокие значения среднеквадратических отклонений и коэффициентов вариации (см. табл.9.1) при различных законах распределений наработок до отказа деталей (см.рис.9.1) указывают на сложность построения эффективной системы ТО на регламентированной основе.

9.1. Рекомендации по составу и содержанию системы технического обслуживания

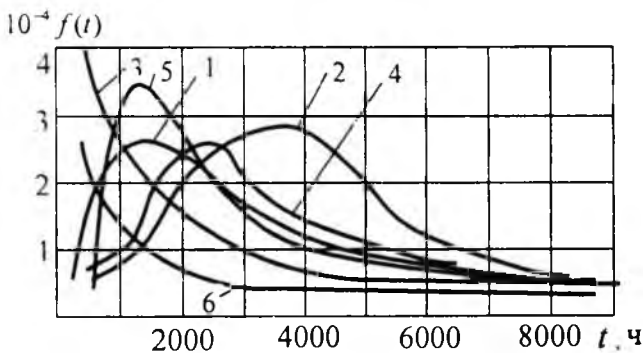
Известно, что ТО может быть регламентированным и нерегламентированным. Регламентированное ТО проводится с установленной в эксплуатационной документации периодичностью, меньшей (или равной) периодичности ТР наименьшего ранга (объема) [52], и на его проведение предусматривается специальное время. В

Таблица 9.1

Данные о безотказности деталей коробки передач и фрикционной муфты подъемных установок АЗИНМАШ-43А и АЗИНМАШ-43П

№	Деталь	Средняя наработка до отказа $\bar{T}_1$, ч	Среднее квадратическое отклонение σ , ч	Коэффициент вариации $V = \frac{\sigma}{\bar{T}_1}$
1.	Коническая шестерня ($z = 17$, $m = 8$ мм)	2660	1550	0,58
2.	Коническое колесо ($z = 34$, $m = 8$ мм)	3080	1400	0,45
3.	Цилиндрическая шестерня ($z = 22$, $m = 7$ мм)	1985	1610	0,81
4.	Цилиндрическое колесо ($z = 28$, $m = 7$ мм)	3388	1450	0,42
5.	Фрикционный вкладыш	2954	1630	0,55
6.	Диафрагма фрикционной муфты	2005	1630	0,81

Кривые плотностей распределения наработок до отказа деталей подъемных установок



Перечень деталей и их нумерация на рисунке идентичны приведенным в табл. 9.1

Рис. 9.1.

состав нерегламентированного ТО входит надзор за работой оборудования, эксплуатационный уход, содержание оборудования в исправном состоянии, включающее: выявление степени изношенности легкодоступных для осмотра сборочных единиц (деталей) и их своевременную замену, проверку гидравлических, пневматических и других систем, состояния ограждающих устройств и т.д.

Обобщение опыта в области технической эксплуатации и реализации методов повышения надежности различных видов оборудования показывает, что наблюдается тенденция постепенного изменения состава системы ТО. Имеют место: рост удельного веса диагностических процедур и на этой основе применение формы обслуживания в виде предупредительной замены ответственных деталей до полного достижения ими предельного состояния; введение наряду с регламентированным ТО оперативного, сезонного и специальных видов ТО; максимальное упрощение системы ТО и сокращение трудоемкости технических воздействий. С учетом этого отмечается уменьшение объема обязательных видов ТО, выполняемых регулярно и принудительно.

Исходя из отмеченных предпосылок и с учетом опубликованных данных на рис.9.2 приведен рекомендуемый состав системы ТО нефтегазопромыслового оборудования. Как видно, наряду с регламентированным ТО, в составе системы предусматривается выполнение: ТО по состоянию, ТО при периодическом демонтаже-монтаже оборудования, оперативного ТО, сезонного ТО и специальных видов ТО. К последним для рассматриваемого оборудования отнесено сервисное обслуживание.

Основными видами управления техническим состоянием и восстановлением ресурса оборудования, являются плановые и неплановые ремонты, реализуемые в виде текущих, агрегатно-узловых и капитальных ремонтов.

Текущий ремонт - это ремонт, осуществляемый для восстановления работоспособности оборудования и состоящий в замене и (или) восстановлении его отдельных составных частей. При текущем ремонте, как правило, выполняются работы, регламентированные техническим обслуживанием: замена отдельных деталей, сборочных единиц и агрегатов; слесарно-сварочные работы; регулировка сочленений; ревизия оборудования; проверка на точность.

Агрегатно-узловой ремонт - является наиболее перспективным методом ремонта оборудования, при котором неисправные узлы и агрегаты заменяются новыми или отремонтированными с

Рациональный состав и содержание системы технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р)

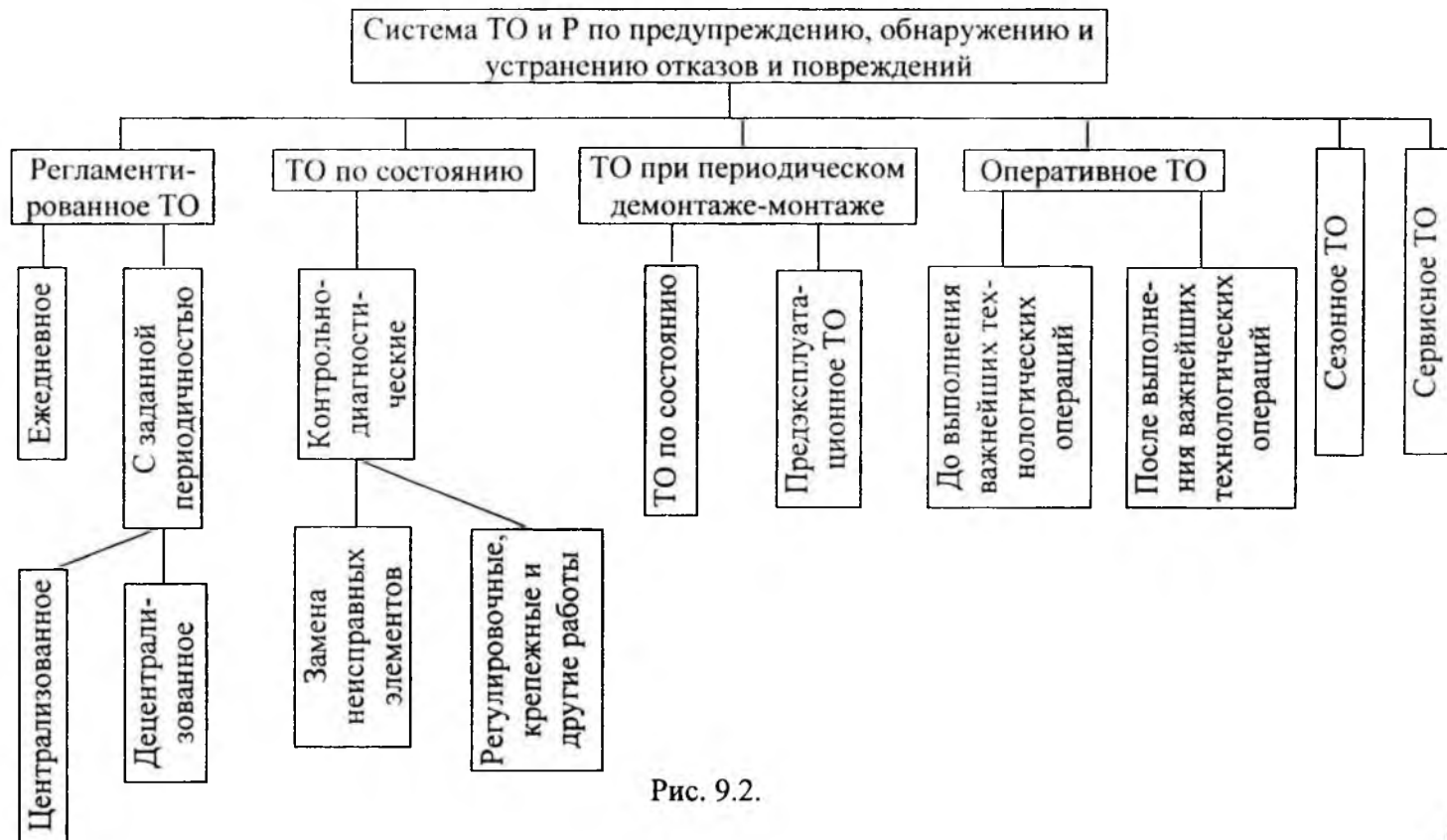


Рис. 9.2.

использованием деталей заводского изготовления. Этот вид ремонта предпочтителен, особенно при неплановых ремонтах.

Одной из разновидностей агрегатно-узлового ремонта является рассредоточенный капитальный ремонт, при котором восстановление ресурса оборудования осуществляется в течение нескольких этапов на протяжении всего ремонтного цикла. В этом случае остановка на выполнение капитального ремонта исключается [52]. Эта разновидность агрегатно-узлового ремонта особенно успешно реализуется на предприятиях, оснащенных средствами технической диагностики.

Капитальный ремонт - это ремонт, выполняемый для обеспечения исправности и полного или близкого к полному восстановления ресурса оборудования с заменой или восстановлением любых его частей.

Неплановый ремонт - направлен на восстановление работоспособности оборудования. При проведении непланового ремонта заменяются или восстанавливаются только те элементы, которые явились причиной отказа или в которых было выявлено прогрессирующее развитие дефекта.

Затраты на поддержание объекта в процессе эксплуатации в исправном состоянии зависят от: характера и интенсивности изменения его технического состояния, организации работ по обслуживанию; состава и содержания системы ТО и Р.

В свою очередь на указанные затраты влияют: трудоемкость работ по ТО и Р, расходы на запасные части и эксплуатационные материалы, убытки от простоев в ожидании ТО и в самом обслуживании и ремонте. Так, трудоемкость этих работ зависит от производительности труда рабочих, которая в свою очередь является следствием организации и уровня диагностических процедур и механизации работ.

Текущие ремонты выполняются только в том случае, когда не удастся восстановить эксплуатационные показатели узла или агрегата регулированием. При этом легкоъемные узлы целесообразнее заменять из оборотного фонда и ремонтировать в производственных (цеховых) условиях, в особенности при необходимости использования стендов и приспособлений.

Рассмотрим содержание приведенного на рис.9.2 рекомендуемого состава системы ТО и Р нефтегазопромыслового оборудования.

Регламентированное техническое обслуживание. Эта форма ТО выполняется через строго установленные интервалы, измеряемые числом часов наработки или календарным временем.

Основное назначение этой формы ТО - выявление и устранение имеющих место отказов и повреждений элементов и составных частей функциональных систем оборудования на ранних стадиях их развития, а также проведение профилактических мероприятий по предотвращению возникновения отказов при дальнейшей эксплуатации в период до очередного регламентированного ТО.

К регламентированным ТО относятся: ежедневное ТО, первое ТО (форма №1), второе ТО (форма №2), далее, при необходимости (например, для установок, предназначенных для сверхглубокого бурения скважин): форма №3 и форма №4. В состав ежедневного ТО входят контрольные, моечные, смазочные и заправочные работы. К первому ТО относятся: контрольные, крепежные и регулировочные работы с текущим ремонтом - заменой ряда быстроизнашивающихся деталей и узлов.

К второму ТО относятся: контрольные, крепежные и регулировочные работы; при необходимости текущий или агрегатно-узловой ремонт.

Частным случаем регламентированного ТО являются плановые контрольные технические осмотры оборудования, проводимые с целью:

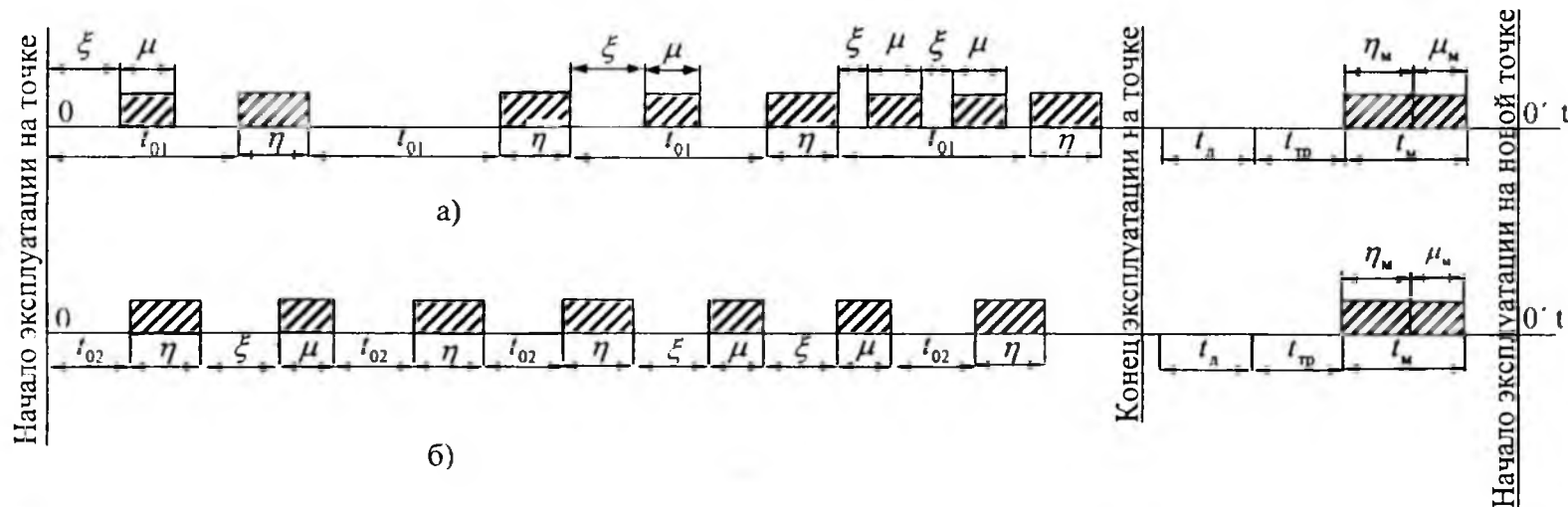
- выявления повреждений, которые могут привести к поломке или аварийному отказу оборудования;
- установления технического состояния наиболее ответственных деталей (сборочных единиц) и уточнения объема и вида предстоящего ремонта;
- проверки полноты и качества выполнения операций по ТО оборудования.

Регламентированная стратегия ТО нередко нарушается внезапными отказами, устранение которых производится неплановыми ремонтами. В этом случае подобная стратегия носит название смешанной стратегии.

Если регламентированная стратегия ТО заключается в проведении обслуживания с постоянным периодом независимо от числа отказов, то смешанная стратегия включает в себя регламентированное ТО и неплановые ремонты оборудования, которые в основном осуществляются путем текущего или агрегатно-узлового ремонта.

Временные диаграммы для плановой (первой) и смешанной (второй) стратегии ТО и Р, представлены на рис.9.3.

Временные диаграммы: для первой (плановой) стратегии ТО (а);
для второй (смешанной) стратегии ТО (б)



t_{01} и t_{02} - периоды ТО соответственно при первой и второй стратегии; ξ - случайное время безотказной работы; η и η_m - случайная длительность проведения планового и предэксплуатационного ТО; μ и μ_m - случайная длительность проведения неплановых Р в период эксплуатации и при монтаже; t_d , t_{tr} , t_m - время затрачиваемое соответственно на демонтаж, транспортирование и монтаж.

Рис. 9.3.

Первая стратегия предусматривает проведение ТО через фиксированное время t_{01} , независимо от числа отказов изделия за это время. По истечении времени t_{01} производится ТО случайной длительностью η . Отказы, возникающие за период между очередными ТО, через случайное время $\xi (\xi < t_{01})$, устраняются за случайное время μ .

Вторая стратегия заключается в проведении ТО через фиксированное время t_{02} (см.рис.9.3); при этом на ТО затрачивается случайное время η . Если изделие отказывает в случайный момент времени $\xi (\xi < t_{02})$, то производится устранение отказа за случайное время μ . Следующее ТО производится через время t_{02} , если за это время изделие не отказывает, и через время ξ , если оно откажет и т.д.

Таким образом, состав регламентированных работ по ТО и периодичность их выполнения зависят, в конечном счете, от интенсивности изменения технического состояния (износа) деталей и сопряжений.

Техническое обслуживание по состоянию. Данная форма ТО представляет собой совокупность правил по определению режимов и регламента контроля состояния, а также принятию решений о необходимости обслуживания, замены деталей или ремонта оборудования на основе информации о фактическом техническом состоянии.

При ТО по состоянию перечень и периодичность выполняемых операций определяются фактическим техническим состоянием деталей и узлов к моменту начала ТО. Объем ремонтных работ при данной форме ТО, в том числе и объем разборочных и демонтажных работ, определяются по результатам периодического диагностирования объекта (табл.9.2), а также по данным о надежности этого объекта или изделий-аналогов.

Процесс ТО и Р по состоянию предусматривает обязательное выявление и устранение так называемых «слабых мест» оборудования путем организационных, технических и технологических работ, в зависимости от характеристик слабого места. Анализ слабых мест выполняется на основании периодических проверок и оценки их влияния на снижение эффективности функционирования узлов и агрегатов, как вследствие снижения производительности, так и увеличения ремонтных затрат. Регулярное устранение слабых

мест способствует постоянному повышению функциональной надежности оборудования и, как следствие, увеличению межремонтных периодов.

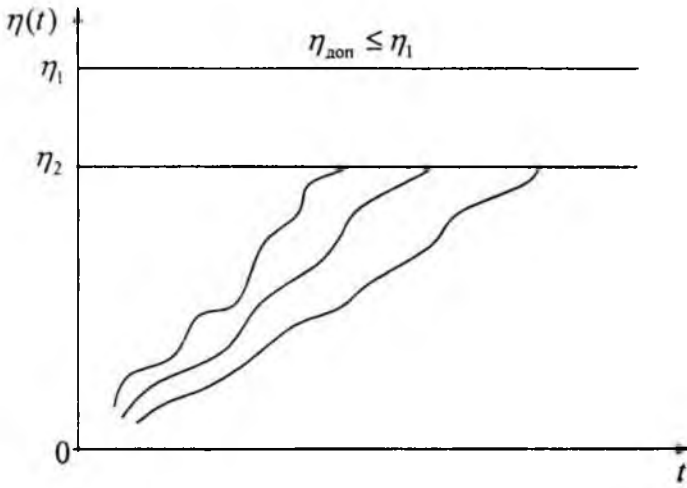
Таблица 9.2

Виды функциональной информации и их содержание для диагностирования системы

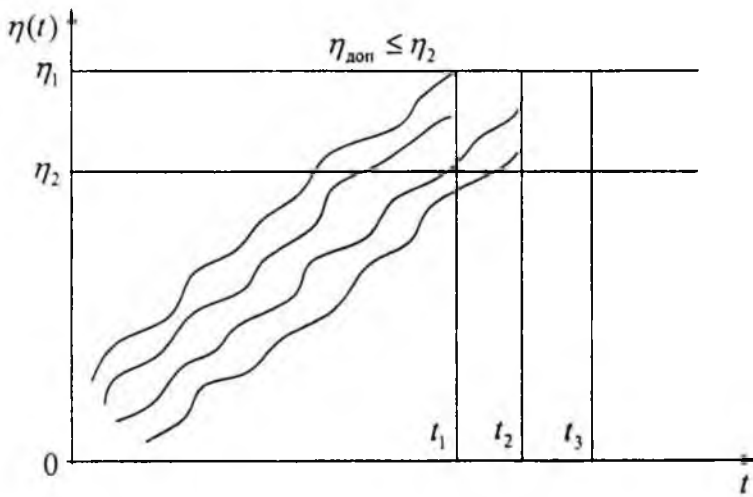
Вид функциональной информации	Содержание
Параметрическая	Параметры рабочей характеристики изделия: мощность, грузоподъемность, производительность, частота вращения и т.д.
Геометрическая	Точность размеров, формы и расположения поверхностей, их шероховатость, степень износа.
Механическая	Механическая прочность, жесткость (деформация), вибрация.
Физическая	Отклонение в стабильности электрических, электромагнитных и магнитных характеристик.
Тепловая	Температура среды, тепловой режим работы.
Нарушение герметичности	Плотность соединений и полостей, находящихся под избыточным внутренним и (или) внешним давлением.
Акустическая	Уровень, интенсивность и спектральный состав возникающих при эксплуатации шумов и акустических полей.
Химическая	Отклонение химического состава продуктов, сопутствующих эксплуатации объекта.

Очевидно, что при известном случайном процессе изменения параметра $\eta(t)$, определяющего техническое состояние объекта, каждому его фиксированному значению $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$ (см. рис. 9.4) соответствует конкретная величина периодичности проверок Δt . При этом, чем больше эти величины, тем меньше затраты на проверки (реже проверки) и больше затраты на замену (чаще замены) или ремонт и наоборот. Оптимальный вариант выбирается из условия обеспечения минимальных удельных затрат на проверку, замену (или ремонт) объекта.

Особенности непрерывного (а) и периодического (б) контроля параметров, определяющих техническое состояние объекта



а)



б)

Рис. 9.4.

Решение о продолжении эксплуатации до следующей проверки или необходимости замены (регулировки) объекта принимается по результатам непрерывного (рис.9.4а) или периодического (рис.9.4б) контроля параметров, определяющих техническое состояние.

Форма ТО по состоянию предполагает обеспечение высокого уровня эксплуатационной и ремонтной технологичности конструкций, создание эффективных средств диагностирования (см.табл.9.2) и средств неразрушающего контроля, а также развитие необходимой производственно-технической базы.

Техническое обслуживание при периодическом демонтаже-монтаже. Затраты на предэксплуатационное обслуживание оборудования зависят и от периодичности демонтажно-монтажных работ, которые колеблются от нескольких часов (например, при цементировании скважин) до нескольких сот часов и выше (бурение скважин). При малом ее периоде вероятность нахождения оборудования в работоспособном состоянии будет достаточно высокой и излишние работы по предэксплуатационному техническому обслуживанию лишь увеличат затраты, в том числе обусловленные дополнительным простым оборудования во время их проведения.

В период повторного монтажа, с целью полного восстановления безотказности к началу работы оборудования на новой точке, проводится регламентированное (а при необходимости и досрочное) техническое обслуживание (ТО) и ремонт (Р) соответствующих сборочных единиц и агрегатов. Последнее требует определенной корректировки также методики оценки общепринятых показателей надежности (см.раздел 2.2.6).

В рассматриваемом случае увеличивается число состояний системы: появляются условия, когда система целиком или некоторые ее подсистемы находятся в состоянии повторного демонтажа или монтажа с возможностью выполнения в полном объеме или части определенных операций системы ТО и Р.

Оперативное техническое обслуживание. Эта форма ТО производится непосредственно перед выполнением важных и трудоемких технологических операций.

Особое место в оперативном ТО занимают работы по поиску и устранению отказов и повреждений элементов функциональных систем. Учитывая стохастическую природу отказов, поиск их причин и своевременное устранение зачастую (при отсутствии соответствующих диагностических стендов и аппаратуры) представляется весьма сложной процедурой.

Необходимость, частота и последовательность выполнения оперативного ТО обуславливаются характером и условиями использования оборудования по назначению.

Для бурового оборудования характерным, например, является проведение оперативного ТО перед спуском обсадных колонн, когда требуется обеспечение высокой надежности подъемного оборудования, в особенности талевой и тормозной систем. Важным является также выполнение оперативного ТО перед необходимостью устранения возникших в бурении аварийных ситуаций. К ним относятся прихваты и поломки бурильных и обсадных труб, аварии с турбобурами, долотами и другие.

Проведение оперативного ТО необходимо также перед аварийно-восстановительными работами при освоении и ремонте скважин, в особенности при фонтанном способе добычи нефти.

Сезонное техническое обслуживание. Сезонная форма ТО осуществляется при переходе к зимней и летней эксплуатации агрегатов и систем. Производятся: промывка системы охлаждения двигателей для удаления накипи; проверка работы термостатов, жалюзи, дистанционных термометров; замена антифриза; замена смазок на соответствующие сезону сорта; промывка топливных баков и т.п.

Сервисное техническое обслуживание. Организация сервисного ТО является одним из перспективных направлений, связанных с уменьшением затрат на выполнение ТО и устранение отказов оборудования [22].

В нефтепромысловом секторе зарубежных стран сервисному ТО оборудования уделяется большое внимание, так как от стабильности функционирования сложных комплексов машин и оборудования, нередко эксплуатируемых в экстремальных условиях, во многом зависят важнейшие экономические показатели работы предприятий. Поэтому сокращение простоев оборудования в обслуживании и ремонте является основной задачей системы сервисного обслуживания, в которой основной упор делается на плановую профилактику и оперативное ТО.

Внедрение плановой профилактики считается оправданным, когда издержки, связанные с отказами оборудования, больше, чем затраты на его нормальное функционирование. Последнее может быть обеспечено либо путем своевременной замены составных частей оборудования, либо проведением плановой профилактики. Выбор величины ремонтного цикла, потребность в ремонтном персонале, запасных частях и материалах, целесообразность модерни-

зации или своевременного списания машин и агрегатов рассчитываются, как правило, методом математического моделирования на основе теорий вероятностей и массового обслуживания.

Сервисное ТО особенно важно для нефтегазопромыслового оборудования в рамках выполнения предэксплуатационного ТО, предшествующего очередному циклу эксплуатации, и оперативного ТО, выполняемого перед наиболее ответственными операциями.

Наряду с составом и содержанием системы технического обслуживания, исходя из особенностей эксплуатации нефтепромыслового оборудования (в том числе условий функционирования установок с периодическим демонтажом и повторным монтажом), важным является также: определение периодичности контроля технического состояния, технического обслуживания и текущих ремонтов объектов; оценка остаточного межремонтного ресурса; исследование нештатных ситуаций при ремонтах; определение номенклатуры и потребности в запасных частях; разработка модели технического обслуживания и ремонта объектов на специализированном предприятии.

9.2. Определение оптимальной периодичности контроля технического состояния оборудования

При контрольных технических осмотрах оборудования имеется возможность устанавливать фактическое состояние деталей, сопряжений и сборочных единиц, их соответствие планируемому виду технического обслуживания (ТО) и вносить возможные изменения в планы текущих ремонтов (ТР). По этой причине контрольные осмотры особенно эффективны для осуществления своевременной замены быстроизнашивающихся деталей и оценки состояния наиболее ответственных функциональных систем.

Надежность отдельных видов оборудования в значительной степени определяется особенностями условий эксплуатации. Известно [16], например, что детали гидравлической части буровых и нефтепромысловых насосов: клапаны, поршни и плунжеры, штоки и уплотнительные элементы, и ряд других деталей имеют низкий ресурс. В связи с этим, параметр потока их отказов резко возрастает, что приводит к необходимости выполнения значительного объема неплановых ТР. Поэтому для предотвращения отказов, а следовательно, уменьшения объема неплановых ремонтов для замен подобных деталей, выполнение в пределах системы ТО контрольных

осмотров с выявлением по внешним признакам повреждений и отказов деталей (сборочных единиц) является особенно эффективным. Это позволяет поддерживать определенный уровень надежности оборудования путем своевременного предупреждения и устранения отказов.

Исходя из отмеченного, работы, проводимые по результатам контрольных технических осмотров, могут быть подразделены на две группы. В рамках проведения ТО: регулировочные работы (например, натяга в уплотнениях штока насоса или напорной трубы вертлюга) или устранение возникших повреждений (затяжка соединений и др.). В рамках проведения ТР: замены вследствие отказа отдельных деталей (например, уплотнительных манжет) или сборочных единиц (например, в гидравлической части насосов).

Наряду с отмеченным, контрольные технические осмотры оборудования эффективны при периодически проводимых демонстражах-монтажах оборудования с транспортированием на новые точки эксплуатации.

Продолжительность работы на одной точке оборудования, подвергаемого периодическому повторному монтажу, длится от нескольких часов (например, при цементировании скважин) до нескольких тысяч часов и выше (при бурении скважин). При завершении работы на точке эксплуатации оборудование подвергается демонтажу, проходит соответствующий контрольный осмотр и по его результатам определяется необходимый объем ремонтных работ. До начала монтажа на новой точке сборочные единицы и агрегаты, подлежащие значительному ремонту, заменяются из оборотного фонда, и в процессе монтажа производится предэксплуатационное техническое обслуживание.

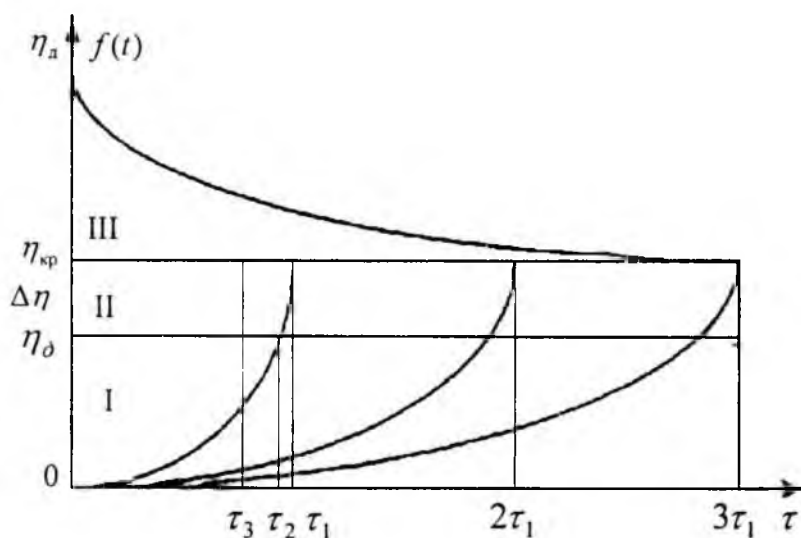
Очевидно, что затраты на предэксплуатационное обслуживание зависят от периодичности демонстражно-монтажных работ. При ее малом периоде вероятность нахождения оборудования на момент контрольного осмотра в работоспособном состоянии будет достаточно высокой и излишние контрольные осмотры и предэксплуатационные технические обслуживания лишь увеличат затраты, обусловленные в основном простым оборудованием во время их проведения. Отсюда следует, что при малой продолжительности работы оборудования между двумя последовательными монтажами контрольные осмотры более целесообразно проводить не при каждом демонтаже-монтаже, а с определенной периодичностью.

Ниже рассматривается метод определения этой периодичности исходя из величины упреждающего допуска параметра техни-

ческого состояния, обеспечивающего минимум удельных суммарных затрат на эксплуатацию оборудования. При этом работоспособность, а следовательно, и эксплуатационная надежность одноклассовых видов сборочных единиц и агрегатов определяются соответствующим параметром технического состояния $\eta(t)$.

В качестве исходной принимается схема (рис.9.5) с тремя состояниями [44], где $\eta(t)$ - монотонная случайная функция неслучайного аргумента, динамика изменения параметра которой для совокупности одноклассового оборудования характеризуется веером реализаций, а случайная величина его ресурса - плотностью распределения времени безотказной работы оборудования $f(t)$.

Динамика изменения параметра технического состояния оборудования



- I - область исправного состояния;
- II - область контроля технического состояния;
- III - область неработоспособного состояния.

Рис. 9.5.

Превышение предельного значения параметра $\eta_{кр}$ приводит к отказу оборудования; не превышение допустимого значения параметра η_{δ} на момент контрольного осмотра (диагностики) обеспечивает с заданной вероятностью работоспособность оборудования

до следующего контрольного осмотра; η_n - номинальное (нормированное) значение параметра; $\Delta\eta = |\eta_{кр} - \eta_n|$ - упреждающий допуск параметра в процессе эксплуатации. Очевидно, что изменение упреждающего допуска $\Delta\eta$ и периодичности контрольных осмотров влияют на вероятность отказа оборудования и стоимость его эксплуатации.

Примем, что контроль технического состояния оборудования выполняется в момент времени τ_1 , а время достижения параметром $\eta(t)$ значения η_n равно $\tau_2 < \tau_1$. Если в момент τ_1 $\eta(t) \leq \eta_n$, то оборудование допускается к дальнейшей эксплуатации, если $\eta_n \leq \eta(t) \leq \eta_{кр}$, то проводится текущий ремонт оборудования; при $\eta(t) > \eta_{кр}$ проводится агрегатно-узловой или при необходимости - капитальный ремонт оборудования. Примем также, что работа оборудования на точке может завершиться демонтажом в момент времени $\tau_3 < \tau_2$ (см.рис.9.5) с последующим транспортированием и монтажом на новой точке эксплуатации. Если при этом окажется, что $T_p > T'_{мр} > \tau_1 - \tau_3$ (где T_p - время работы после завершения монтажа оборудования до очередного демонтажа; $T'_{мр}$ - время до очередного планового ремонта), то возможна после демонтажа преждевременная отправка оборудования на капитальный ремонт (см. ниже, раздел 9.3.3):

Обозначим через L - функцию суммарных затрат на эксплуатацию оборудования за время T . Поскольку в этом случае отмечается недоиспользование ресурса рассматриваемого агрегата (или сборочной единицы), то задачу определения оптимальной периодичности контроля технического состояния оборудования можно сформулировать следующим образом: определить с учетом событий, которые могут произойти за время τ_1 (включая и возможный демонтаж оборудования за время $\tau_3 < \tau_1$), периодичность контрольных осмотров за это время и величину упреждающего допуска $\Delta\eta$, обеспечивающих минимальное значение функции L при заданном уровне надежности, и в том числе убытков от недоиспользования ресурса сборочной единицы.

За период τ_1 , могут произойти следующие события:

1 Рассматриваемая сборочная единица (агрегат) полностью исчерпала свой ресурс и будет произведен ее ремонт или замена в эксплуатации. В этом случае появятся затраты на ремонт или замену

сборочной единицы, а также убытки от простоя оборудования в ремонте. Вероятность этого события

$$P_1 = \int_0^{\tau_1} f(t) dt, \quad (9.1)$$

где $f(t)$ - функция плотности распределения времени безотказной работы; она может быть получена в результате обработки статистической информации.

2. До момента времени τ_1 оборудование проработало без отказа, но результаты контрольного осмотра указывают на необходимость выполнения текущего ремонта. В этом случае будут произведены затраты на контрольный технический осмотр и текущий ремонт, а также будут иметь место убытки от простоя оборудования при контрольном осмотре. Вероятность такого события

$$P_2 = \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} f(t) dt. \quad (9.2)$$

3. Оборудование безотказно проработало до момента времени τ_1 и по результатам контрольного технического осмотра признано годным для дальнейшей эксплуатации. В данном случае будут произведены затраты только на контрольный осмотр и будут иметь место убытки от простоя оборудования за время контрольного осмотра. Вероятность этого события

$$P_3 = \int_{\tau_1 + \tau_2}^{\infty} f(t) dt. \quad (9.3)$$

4. Рассматриваемая сборочная единица оборудования на момент демонтажа на последней точке эксплуатации не полностью исчерпало свой ресурс. Однако оставшийся недоиспользованным ресурс недостаточен для выполнения объема работ на очередной точке (см. τ_3 на рис.9.5). Это событие также входит в рассматриваемую полную группу несовместных событий и ее вероятность

$$P_4 = \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_3} f(t) dt. \quad (9.4)$$

Затраты на контроль технического состояния (диагностику), текущий и агрегатно-узловой ремонт, а также убытки от простоев складываются из:

а) стоимости агрегатно-узлового ремонта (замены) отказавшей сборочной единицы оборудования за время τ_1

$$C_1 = a_1 P_1, \quad (9.5)$$

где a_1 - средние затраты на агрегатно-узловой ремонт отказавшего оборудования;

б) убытков от простоя отказавшего оборудования за время τ_1

$$C_2 = a_2 P_1 \cdot T_{\text{пр}}, \quad (9.6)$$

где a_2 - стоимость продукции, производимой в единицу времени;

$T_{\text{пр}} = \tau_1 - \int_0^{\tau_1} t \cdot f(t) \cdot dt$ - средняя продолжительность агрегатно-узлов
вого ремонта;

в) стоимости контрольных осмотров оборудования, не отказавшего к моменту времени τ_1

$$C_3 = a_3 (P_2 + P_3), \quad (9.7)$$

где a_3 - средние затраты на контрольные осмотры;

г) убытков от простоя оборудования во время контрольных осмотров

$$C_4 = a_2 (P_2 + P_3) \cdot T_{\text{ко}}, \quad (9.8)$$

где $T_{\text{ко}}$ - средняя продолжительность контрольных осмотров;

д) стоимости текущего ремонта оборудования, не отказавшего к моменту времени τ_1 и контролируемый параметр которого находится в поле упреждающего допуска ($\eta_d < \eta(t) < \eta_{\text{кр}}$)

$$C_5 = a_4 P_2, \quad (9.9)$$

где a_4 - средние затраты на текущий ремонт;

е) убытков от простоя оборудования за время текущего ремонта

$$C_6 = a_2 P_2 \cdot T_{\text{пр}}, \quad (9.10)$$

где $T_{\text{пр}}$ - средняя продолжительность текущего ремонта;

ж) убытков от недоиспользования ресурса рассматриваемой сборочной единицы оборудования из-за преждевременной передачи оборудования на капитальный ремонт

$$C_7 = a_2 P_4 \cdot T_{\text{нр}}, \quad (9.11)$$

где $T_{\text{нр}}$ - средняя величина недоиспользованного ресурса.

С учетом полученных соотношений целевая функция L , связанная с издержками на единицу времени, будет иметь вид

$$L = \frac{1}{\tau_1} \sum_{i=1}^7 C_i. \quad (9.12)$$

После подстановки в последнее соотношение C_i , получим

$$L = \frac{1}{\tau_1} \left[a_1 \int_0^{\tau_1} f(t) dt + a_2 T_{\text{тр}} \int_0^{\tau_1} f(t) dt + a_3 \int_{\tau_1}^{\infty} f(t) dt + a_2 T_{\text{ко}} \int_{\tau_1}^{\infty} f(t) dt + \right. \\ \left. + a_4 \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} f(t) dt + a_2 T_{\text{тр}} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} f(t) dt + a_2 T_{\text{нр}} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} f(t) dt \right]. \quad (9.13)$$

Функция L зависит в основном от переменной τ_2 и ее наименьшее значение может быть достигнуто только на концах интервала. В соответствии с постановкой задачи $0 \leq \tau_2 \leq \tau_1$. Из условия стационарности рассматриваемого процесса, можно принять $\tau_1 = \tau_2$. Так как стоимость агрегатно-узлового ремонта (замены) отказавшей сборочной единицы оборудования выше стоимости ремонта или замены детали, то это означает, что не целесообразно в дальнейшем использовать оборудование, параметр технического состояния которого на момент контрольного осмотра находится в поле упреждающего допуска $\Delta\eta$.

Из условия $\tau_1 = \tau_2$, исходя из рекомендаций В.М. Михлина, может быть получена оптимальная величина упреждающего допуска параметра $\eta(t)$, изменение которой может быть аппроксимировано функцией вида

$$\eta(t) = at^\alpha + b, \quad (9.14)$$

где a - коэффициент, характеризующий скорость изменения параметра технического состояния в период эксплуатации;

b - коэффициент изменения параметра за время приработки.

Принимая закон изменения $\eta(t) = at^\alpha$, будем иметь $\eta_{\text{кр}} = a(2\tau_1)^\alpha$; $\eta_{\text{д}} = a\tau_1^\alpha$. Тогда $\tau_1^\alpha = \left(\frac{1}{a \cdot 2^\alpha} \right) \eta_{\text{кр}}$ и $\eta_{\text{д}} = \left(\frac{1}{2^\alpha} \right) \eta_{\text{кр}}$. Величина упреждающего допуска $\Delta\eta = \eta_{\text{кр}} - \eta_{\text{д}} = \eta_{\text{кр}} \left[1 - \frac{1}{2^\alpha} \right]$. В случае, если $\alpha = 1$, т.е. в предположении, что $\eta(t)$ - линейная функция, $\Delta\eta = \left(\frac{1}{2} \right) \eta_{\text{кр}}$.

Исходя из условия $\tau_2 = \tau_1$ и в силу стационарности процесса

$$\int_{\tau_1}^{\tau_1+\tau_2} f(t)dt = \int_{\tau_1}^{2\tau_1} f(t)dt = \int_0^{\tau_1} f(t)dt;$$

$$\int_{\tau_1}^{m_1\tau_1} f(t)dt = \int_0^{m\tau_1} f(t)dt.$$

Принимаем $\tau_3 = m\tau_1$ ($0 < m < 1$) или $\tau_1 + \tau_3 = (1+m)\tau_1 = m_1\tau_1$ ($1 < m_1 < 2$), а также $T_{np} = k\tau_1$ ($k < 1$), где m, m_1 и k - коэффициенты, определяемые по данным эксплуатации изделия-аналога.

С учетом отмеченного из (9.13), получим:

$$L = \frac{1}{\tau_1} \left[a_1 \int_0^{\tau_1} f(t)dt + a_2 T_{np} \int_0^{\tau_1} f(t)dt + a_3 \int_{\tau_1}^{\infty} f(t)dt + a_2 T_{ko} \int_{\tau_1}^{\infty} f(t)dt + \right. \\ \left. + a_4 \int_{\tau_1}^{2\tau_1} f(t)dt + a_2 T_{np} \int_{\tau_1}^{2\tau_1} f(t)dt + a_2 T_{np} \int_{\tau_1}^{m_1\tau_1} f(t)dt \right]. \quad (9.15)$$

Тогда

$$L = \frac{1}{\tau_1} \left[(a_1 + a_2 T_{np} + a_4) \int_0^{\tau_1} f(t)dt + (a_3 + a_2 T_{ko}) \int_{\tau_1}^{\infty} f(t)dt + \right. \\ \left. + a_2 T_{np} \int_0^{m_1\tau_1} f(t)dt \right] + ka_2 \int_0^{\tau_1} f(t)dt. \quad (9.16)$$

Рассматриваемые сложные механические системы обычно состоят из большого числа деталей и сборочных единиц. Доказано [24], что если система состоит из большого числа элементов, имеющих различные наработки до отказа, то распределение наработки всей системы будет приближаться к экспоненциальному распределению. Следовательно, в этом случае плотности распределений

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\lambda > 0); \quad f(\tau_1 + \tau_2) = \lambda e^{-\lambda(\tau_1 + \tau_2)}; \quad f(\tau_1 + \tau_3) = \lambda e^{-\lambda(\tau_1 + \tau_3)}.$$

Учитывая, что $\int_0^{\tau_1} f(t)dt = 1 - e^{-\lambda\tau_1}$; $\int_{\tau_1}^{\infty} f(t)dt = e^{-\lambda\tau_1}$, будем иметь:

$$L = \frac{1}{\tau_1} \left[(a_1 + a_2 \cdot T_{np} + a_4)(1 - e^{-\lambda\tau_1}) + (a_3 + a_2 \cdot T_{ko})e^{-\lambda\tau_1} + \right. \\ \left. + a_2 \cdot T_{np}(1 - e^{-\lambda m_1\tau_1}) \right] + ka_2(1 - e^{-\lambda\tau_1}). \quad (9.17)$$

В результате из условия $L' = 0$, получим:

$$\begin{aligned} & \tau_1 \left[(a_1 + a_2 \cdot T_{\text{тр}} + a_4) \lambda e^{-\lambda \tau_1} - (a_2 \cdot T_{\text{ко}} + a_3) \lambda e^{-\lambda \tau_1} + \right. \\ & \left. + a_2 m T_{\text{нр}} \lambda e^{-\lambda m \tau_1} \right] - \left[(a_1 + a_2 \cdot T_{\text{тр}} + a_4) (1 - e^{-\lambda \tau_1}) + \right. \\ & \left. + (a_2 \cdot T_{\text{ко}} + a_3) e^{-\lambda \tau_1} + a_2 T_{\text{нр}} (1 - e^{-\lambda m \tau_1}) \right] + \tau_1^2 k a_2 e^{-\lambda \tau_1} = 0. \end{aligned} \quad (9.18)$$

Введем обозначения:

$$M = a_1 + a_2 \cdot T_{\text{тр}} + a_4; \quad N = a_2 \cdot T_{\text{ко}} + a_3; \quad P = a_2 m T_{\text{нр}}; \quad Q = \frac{k a_2}{\lambda}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \tau_1 \left[M \lambda e^{-\lambda \tau_1} - N \lambda e^{-\lambda \tau_1} + P \lambda e^{-\lambda m \tau_1} \right] - \left[M (1 - e^{-\lambda \tau_1}) + \right. \\ & \left. + N e^{-\lambda \tau_1} + a_2 T_{\text{нр}} (1 - e^{-\lambda m \tau_1}) \right] + Q (\lambda \tau_1)^2 e^{-\lambda \tau_1} = 0. \end{aligned} \quad (9.19)$$

Преобразуем последнее выражение:

$$\begin{aligned} & [(M - N) \lambda \tau_1 + (M - N)] e^{-\lambda \tau_1} + \lambda \tau_1 P e^{-\lambda m \tau_1} - M - \\ & - a_2 T_{\text{нр}} (1 - e^{-\lambda m \tau_1}) + (\lambda \tau_1)^2 Q e^{-\lambda \tau_1} = 0. \end{aligned} \quad (9.20)$$

Для получения приближенного значения периодичности контрольных осмотров τ_1 разложим $e^{-\lambda \tau_1}$ в ряд Маклорена

$$e^{-\lambda \tau_1} = 1 + \frac{-\lambda \tau_1}{1!} + \frac{(-\lambda \tau_1)^2}{2!} + \frac{(-\lambda \tau_1)^3}{3!} + \frac{(-\lambda \tau_1)^4}{4!} + \dots \quad (9.21)$$

Если сохранить в разложении только один член ($\lambda \tau_1 \ll 1$), то получим $(M - N) \lambda \tau_1 - N + P \lambda \tau_1 + Q (\lambda \tau_1)^2 = 0$.

Тогда оптимальное время выполнения контрольных осмотров определится

$$\tau_1 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{(N - M - P) + \sqrt{(N - M - P)^2 + 4QN}}{2Q}. \quad (9.22)$$

Естественно, если в разложении сохранить большее число членов, то будем иметь соответствующие уравнения, которые могут быть решены численно с более высокой степенью точности.

В случае, если значения коэффициентов m и k неизвестны, из зависимости (9.13) при $L'_{\tau_1} = 0$, имеем:

$$\begin{aligned} & \tau_1 \left[(a_1 + a_2 \cdot T_{\text{нр}} + a_4 + a_2 \cdot T_{\text{тр}}) \lambda e^{-\lambda \tau_1} - (a_3 + a_2 \cdot T_{\text{ко}}) \lambda e^{-\lambda \tau_1} \right] - \\ & - \left[(a_1 + a_2 \cdot T_{\text{нр}} + a_4 + a_2 \cdot T_{\text{тр}}) (1 - e^{-\lambda \tau_1}) + (a_3 + a_2 \cdot T_{\text{ко}}) e^{-\lambda \tau_1} + \right. \\ & \left. + a_2 T_{\text{нр}} (1 - e^{-\lambda \tau_1}) \right] = 0. \end{aligned} \quad (9.23)$$

Наряду с обозначением N введем $M_1 = a_1 + a_2 \cdot T_{\text{пр}} + a_4 + a_2 \cdot T_{\text{тр}}$ и $R = a_2 T_{\text{пр}} (1 - e^{-\lambda \tau_1})$. Тогда после преобразований, с учетом разложения $e^{-\lambda \tau_1}$ в ряд Маклорена, для этого случая получим

$$\tau_1 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{N + R}{M_1 - N}. \quad (9.24)$$

Таким образом, наибольшего эффекта можно достигнуть при контроле технического состояния оборудования с периодичностью τ_1 . Если же время работы объекта до очередного демонтажа-монтажа τ_3 значительно меньше τ_1 , то контрольные осмотры целесообразно проводить через кратное число демонтажно-монтажных работ, определяемое через соотношение τ_1/τ_3 .

9.3. Повышение межрегламентного ресурса оборудования

В настоящее время, применительно к сложным системам, имеющим наряду с механическими подсистемами гидравлические, пневматические, электронные и другие подсистемы, рекомендуются различные виды ТО. К ним относятся: периодическое, оперативное, сезонное, ТО «по состоянию», при хранении. Кроме того, рекомендуется выполнять специальные виды ТО в случаях возникновения резких отклонений от нормальных условий эксплуатации [52].

Существующая система ТО и ТР нефтепромыслового оборудования в основном связана с применением стратегий обслуживания и ремонта по календарному времени или по наработке с начала эксплуатации или же после капитального (агрегатно-узлового) ремонта.

При этом наиболее важным является определение оптимального значения межрегламентного ресурса машин и агрегатов для установления периодичности выполнения определенного перечня профилактических и ремонтных работ.

В работе [31] оценка оптимальной периодичности выполнения регламентных работ рекомендуется производить исходя из среднего значения коэффициента потерь $K_{\text{пв}}$ на восстановление данного изделия.

$$K_{\text{пв}} = (\bar{\tau}_{\text{рр}} + \bar{\tau}_{\text{в}}) / t_{\text{н}}. \quad (9.25)$$

где $\bar{\tau}_{\text{рр}}$ - среднее время, затрачиваемое на выполнение регламентных работ в одном межремонтном периоде, ч.;

$\bar{\tau}_a$ - среднее время, затрачиваемое на восстановление отказавшего изделия, ч;

t_n - наработка изделия за один межремонтный период, ч.

Среднее время обнаружения и устранения отказов изделия в одном межремонтном периоде

$$\bar{\tau}_a = \bar{\tau}_{a1} \cdot n(t_n), \quad (9.26)$$

где $\bar{\tau}_{a1}$ - среднее время обнаружения и устранения одного отказа, ч;

$n(t_n)$ - среднее число отказов за один межремонтный период.

Тогда

$$K_{пв} = \frac{\bar{\tau}_{пп} + \bar{\tau}_{a1} \cdot n(t_n)}{t_n}. \quad (9.27)$$

Среднее число отказов $n(t_n)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ изделия связаны зависимостью

$$n(t_n) = \int_0^{t_n} \lambda(t) \cdot dt. \quad (9.28)$$

Известно, что для многих видов нефтепромыслового оборудования функция $\lambda(t)$ является возрастающей. В том числе эта функция может быть аппроксимирована как (см. раздел 3)

$$\lambda(t) = a \cdot m t^{m-1}, \quad (9.29)$$

где a , m - параметры распределения Вейбулла.

Из выражений (9.28) и (9.30) имеем:

$$n(t_n) = a t_n^m. \quad (9.30)$$

Тогда из (9.27) и (9.30) следует:

$$K_{пв} = \frac{\bar{\tau}_{пп}}{t_n} + a \bar{\tau}_{a1} t_n^{m-1}. \quad (9.31)$$

Оптимальное значение межрегламентного ресурса ($t_{н\text{ опт}}$) соответствует минимальному значению коэффициента потерь на восстановление $K_{пв}$. Для определения межрегламентного ресурса необходимо приравнять нулю производную выражения (9.31) по t_n

$$\frac{dK_{пв}}{dt_n} = \left(-\frac{\bar{\tau}_{пп}}{t_n^2} + a \bar{\tau}_{a1} m - 1 \right) t_n^{m-2} \Big|_{t_{н\text{ опт}}} = 0. \quad (9.32)$$

Отсюда

$$t_{н\text{ опт}} = \sqrt[m]{\frac{\bar{\tau}_{пп}}{a(m-1)\tau_{a1}}}. \quad (9.33)$$

Для отдельных видов нефтепромыслового оборудования $\lambda(t) = \lambda_0 + bt$ (где λ_0 - начальное значение интенсивности отказов, 1/ч.; b - коэффициент).

Аналогичным образом для данного случая получим:

$$t_{н\text{ опт}} = \sqrt{\frac{2\bar{\tau}_{pp}}{b \cdot \tau_{nl}}} \quad (9.34)$$

Для случая $\lambda(t) = \lambda_0 + bt^c$ получено выражение [27]:

$$t_{н\text{ опт}} = \left[\frac{(c+1)\bar{\tau}_{pp}}{cb\tau_{nl}} \right]^{\frac{1}{c+1}} \quad (9.35)$$

Из выражений (9.33), (9.34) и (9.35) следует, что для изделий, интенсивность отказов которых постоянна ($m=1$ - см. зависимость (9.33) и $b=0$ - см зависимости (9.34) и (9.35)), оптимальный межремонтный ресурс оказывается равным ∞ , что указывает на нецелесообразность выполнения регламентных работ из-за преобладания внезапных отказов.

В этих случаях прогрессивным представляется переход к стратегии ТО и ТР «по состоянию» с контролем параметров оборудования, определяющим его техническое состояние. При данной стратегии сборочные единицы и агрегаты практически могут эксплуатироваться до предотказового состояния. Однако, применение ее требует создания эффективных средств диагностирования с использованием методов неразрушающего контроля.

При применении сложных современных комплексов (например, для освоения морских месторождений) необходимо учитывать также возможность сервисного обслуживания оборудования.

Сервисное обслуживание продукции машиностроения в зарубежной (в том числе российской) практике в настоящее время формируется по двум направлениям. Первое направление связано с созданием системы самостоятельных сервисных фирм, предоставляющих предприятиям, осуществляющим добычу, первичную переработку и транспорт нефти и газа, разнообразные, в том числе, финансовые услуги. Второе направление - создание подразделений компаний - производителей машинотехнических комплексов, осуществляющих оказание технических услуг по эксплуатации производимых машин, большей частью в комплексе с другим сопутствующим оборудованием.

Одним из основных условий удовлетворения потребностей эксплуатирующих организаций является обеспечение качества сер-

виса оборудования. В общем случае к частным показателям качества сервиса оборудования на конкретном рынке могут относиться [22]:

- качество (достоверность, добросовестность и этичность) рекламы на оборудование;
- гарантийный срок бесплатного технического обслуживания эксплуатирующей организации;
- качество маркировки и упаковки оборудования;
- полнота, достоверность и качество оформления сопроводительной документации на оборудование;
- имидж торговой марки и торгового центра;
- качество обслуживания покупателя, включая доставку товара;
- трудоемкость подготовки оборудования к функционированию или употреблению (в том числе, сборки и монтажа на объекте применения);
- качество послепродажного обслуживания и утилизации оборудования.

В промышленности зарубежных стран особенно большое внимание уделяется организации сервисного технического обслуживания сложных современных комплексов, так как, во-первых, промышленное оборудование с его высоким уровнем механизации требует значительных затрат труда ремонтных рабочих высокой квалификации. Во-вторых, от стабильности функционирования сложных производственных комплексов во многом зависят и основные экономические показатели работы предприятия. Этим объясняется высокая эффективность деятельности в зарубежных странах сервисного обслуживания комплексов нефтегазового оборудования, эксплуатируемых в экстремальных геологических и климатических условиях [22].

Таким образом, современная система обслуживания и ремонта нефтегазового оборудования должна развиваться в двух направлениях. Первое направление необходимо увязывать с контролем технического состояния, проведением обслуживания, текущих и агрегатно-узловых ремонтов по установленным межрегламентным ресурсам машин и агрегатов. Второе направление должно быть нацелено на устранение возможных внезапных отказов оборудования путем организации технического обслуживания «по состоянию», в том числе путем организации сервисного обслуживания определенных комплексов оборудования.

9.3.1. Определение периодичности технического обслуживания

Имеются различные подходы к определению рационального периода ТО машин и оборудования. В большинстве выполненных работ решение этой задачи основано на допустимом изменении параметра, характеризующего техническое состояние оборудования, на допустимом уровне безотказности или минимизации удельных затрат на его эксплуатацию.

Анализ проведенных исследований показывает, что одним из эффективных методов определения периода технического обслуживания является применение среднеинтегрального значения интенсивности отказов $\bar{\lambda}$ [6]. Данный метод определения периода ТО наиболее эффективен в случаях, когда нет информации об экономических убытках по рассматриваемым объектам.

В общем виде задача определения периодичности ТО формулируется следующим образом. Техническое обслуживание должно проводиться через $t_{\text{то}} = t_{\bar{\lambda}}$ и при условии, что $\lambda(t) \geq \lambda(t_{\text{то}})$. То есть вероятность того, что не возникнет отказ внезапного характера, должна быть больше или равна доверительному уровню вероятности P_d рассматриваемого изделия

$$P\{\lambda(t_{\text{то}}) > \bar{\lambda}\} \geq P_d. \quad (9.36)$$

Предложены две стратегии по определению периода ТО для случая, когда в соответствии с статистическими данными имеет место нормальный закон распределения наработок до отказа.

Первая стратегия назначения периода ТО основана на равенстве,

$$\bar{\lambda} \bar{T} = \int_0^{\bar{T}} \lambda(t) dt, \quad (9.37)$$

которое справедливо для среднего ресурса рассматриваемого объекта. Тогда среднеинтегральная интенсивность отказов определяется

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\bar{T}} \int_0^{\bar{T}} \lambda(t) dt. \quad (9.38)$$

После соответствующих преобразований и упрощений получено [6, 41]:

$$\frac{t_{\text{то}}}{\bar{T}} \leq 1 - V \cdot \ln \left[\sqrt{2\pi \cdot V \cdot P_d \cdot \ln 2 \cdot \Phi\left(\frac{1}{V}\right)} \right]^2. \quad (9.39)$$

Как видно, период ТО $t_{\text{ТО}}$, выраженный в долях средней наработки изделия, формируется в зависимости от допустимой вероятности безотказной работы P_d , и коэффициента вариации

$$V = \frac{\sigma}{\bar{T}}.$$

Таким образом, приняв $\bar{T} = t_{\text{ТО}}$, зная коэффициент вариации и задаваясь величиной допустимой вероятности безотказной работы, можно определить $\frac{t_{\text{ТО}}}{\bar{T}}$. В работе [6] приводятся зависимости между $\frac{t_{\text{ТО}}}{\bar{T}}$ и P_d , рассчитанные при различных значениях коэффициента вариации $V = 0,1 \dots 0,5$.

Данную стратегию целесообразно применять в тех случаях, когда последствия отказов рассматриваемых составных частей не обусловлены большими экономическими убытками, так как указанная стратегия предусматривает обеспечение заданного уровня надежности в пределах случайного времени ТО, находящегося в пределах $0 < t \leq \bar{T}$.

Вторая стратегия назначения периода ТО направлена на предотвращение отказов ответственных составных частей оборудования.

В данном случае исследование теоретической функции плотности вероятности $f(t)$ с установлением на ней точки перегиба (левее от математического ожидания), разделяющей переход кривой от вогнутости к выпуклости и, тем самым, означающей границу резкого возрастания плотности вероятностей отказов, позволяет уязвлять предельное значение периода ТО с указанной точкой перегиба и решить поставленную задачу [21].

Рассмотрено свойство теоретической функции плотности вероятностей $f(t)$ нормального закона распределения с целью отыскания на ней точки перегиба.

Плотность вероятностей при нормальном законе распределения равна

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\left(\frac{t - \bar{T}}{\sigma\sqrt{2}} \right)^2 \right]. \quad (9.40)$$

Исходя из этого, получена зависимость [6]:

$$\frac{t_{\text{ТО}_2}}{\bar{T}} \leq 1 - V \sqrt{\ln \left[\frac{1 - V}{\sqrt{2\pi} \cdot V \cdot P_d \cdot \ln 1,19 \Phi \left(\frac{1}{V} \right)} \right]^2}. \quad (9.41)$$

В работе [6] приводятся зависимости между $\frac{t_{\text{ТО}_2}}{\bar{T}}$ и V , рассчитанные для различных значений допустимого значения вероятности безотказной работы P_d . Кроме того, приводятся также стратегии определения периода ТО в случае закона распределения Вейбулла, что характерно зачастую для нефтегазопромыслового оборудования.

Перечисленные стратегии рекомендуется применять для предварительной оценки периода ТО на ранних стадиях разработки объектов с целью нормирования их ресурса.

9.3.2. Определение периодичности проведения текущих ремонтов

Известно, что целью ТО по состоянию и проводимых при этом текущих ремонтов (ТР) с заменами отдельных деталей и сборочных единиц является предупреждение их отказов. Для механических систем можно принять, что объективная замена каждой такой детали в результате контрольного осмотра или непосредственно при ТР является предотвращением одного отказа.

Эффективным является совмещение периодов ТР и регламентированного технического обслуживания (ТО), так как замены деталей и сборочных единиц, как правило, требуют проведения и определенных регулировочных, смазочных и других работ.

Оптимальный период ТР можно установить двумя способами: эмпирически-интуитивными методами и методами расчета на основании теоретико-математических моделей.

Для назначения периода плановой замены отдельных деталей или сборочных единиц эмпирически-интуитивные методы являются достаточно удовлетворительными. Однако для сложных технических систем, при определении времени ТР с заменой быстроизнашивающихся деталей, математические модели дают более точные результаты.

На стадии проектирования наибольшее применение находит назначение $t_{\text{то}}$ на основе минимизации удельных затрат на ТО [34, 40].

Такой подход приемлем и при определении периодичности текущих ремонтов $t_{\text{тр}}$. При этом наибольший эффект достигается при возможности совмещения ТР с периодами технологических простоев.

Наиболее характерным примером является организация ТР буровых насосов в период их технологических простоев - при проведении спуско-подъемных операций, учитывая чрезвычайно низкий ресурс деталей гидравлической части [16].

Для организации текущих ремонтов гидравлической части буровых насосов во время спуско-подъемных операций необходимо знать их продолжительность, которая равна [30]:

$$T_{\text{спо}} = \frac{1}{3600 h_{\text{сп}}} (A_1 L_{\text{max}} + A_2 L_{\text{max}}^2 + A_3 L_{\text{max}}^3),$$

где $h_{\text{сп}}$ - средняя проходка на долото, м;

L_{max} - максимальная глубина скважины (или же текущая глубина скважины в момент определения продолжительности спуско-подъемных операций), м;

A_1, A_2, A_3 - коэффициенты.

Тогда среднее время одного спуско-подъема

$$\bar{t}_{\text{спо}} = \frac{T_{\text{спо}}}{\beta},$$

где β - число рейсов за время бурения скважины.

Зная, что $h_{\text{сп}} = \frac{L_{\text{max}}}{\beta}$, можно окончательно записать:

$$\bar{t}_{\text{спо}} = A_1 + A_2 L_i + A_3 L_i^2,$$

где L_i - текущая глубина скважины, м.

Естественно при установлении периодичности ТР должны быть определены затраты времени на их проведение и сопоставлены с $\bar{t}_{\text{спо}}$.

Время, необходимое для проведения ТР в течение рассматриваемого календарного времени t , может быть определено

$$\tau_{\text{тр}}(t) = N_{\text{тр}}(t) \sum_{i=1}^{n_{\text{сп}}} \tau_{\text{тр}i}, \quad (9.42)$$

где $\tau_{\text{тр}i}$ - время, затрачиваемое на выполнение i -ой операции по ТР
(например, замена одной из деталей, операция по регулировке и др.);

$n_{\text{оп}}$ - число операций при выполнении одного ТР;

$\sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} \tau_{\text{тр}i}$ - время выполнения одного ТР;

$N_{\text{тр}}(t) = \frac{t}{t_{\text{тр}}} \approx 1, 2, \dots, N_{\text{тр}}$ - количество ТР за время t , округленное

до целого числа;

$t_{\text{тр}}$ - периодичность выполнения ТР.

Важное значение имеет экономическая оценка принятой периодичности ТР. Ясно, что увеличение числа операций ТР и частоты их проведения хотя и ведет к увеличению надежности, но требует при этом дополнительные затраты, связанные со стоимостью рабочей силы, запасных частей, материалов, вспомогательных приспособлений и инструмента. Однако, с увеличением эффективности ТР уменьшаются затраты на устранение последствий от отказов (на неплановые ремонты) и, главное, уменьшается величина убытков от неиспользования оборудования по назначению, т.е. уменьшаются эксплуатационные потери. Поэтому при обосновании требований к ТР по экономическому показателю следует исходить из суммарных затрат в эксплуатации.

Годовой экономический эффект от проведения ТР составит

$$\mathcal{E}_{\text{г.тр}} = \mathcal{E}_{\text{г.уб}} - P_{\text{г.тр}},$$

где $\mathcal{E}_{\text{г.тр}}$ - годовой экономический эффект от проведения ТР,
манат/год;

$\mathcal{E}_{\text{г.уб}}$ - годовой экономический эффект от предотвращения возможного убытка, манат/год;

$P_{\text{г.тр}}$ - годовые расходы на ТР, манат/год.

Условием экономической эффективности от ТР является

$$\varepsilon_{\text{тр}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{г.уб}}}{P_{\text{г.тр}}} \geq \varepsilon_{\text{н}},$$

где $\varepsilon_{\text{тр}}$ - коэффициент экономической эффективности ТР;

$\varepsilon_{\text{н}} = 1 + \bar{R}_{\text{тр}}$ - нормативный коэффициент экономической эффективности;

$\bar{R}_{\text{тр}}$ - отношение прибыли к полной себестоимости продукции.

Соблюдение условия $\varepsilon_{\text{тр}} = \varepsilon_n$ означает, что затраты на ТР будут возмещены лишь за счет экономического эффекта в виде предотвращенного убытка. Для нефтепромыслового оборудования в преобладающем большинстве случаев это условие вполне приемлемо, так как во многих случаях оно эксплуатируется в жестком режиме, при котором внезапные отказы нередко приводят к осложнениям и авариям. В этих случаях сами затраты на восстановление оборудования несоизмеримо малы по сравнению с убытками на ликвидацию последствий от аварий.

Расходы на ТР за рассматриваемый период

$$P_{\text{тр}} = C_c + C_d + C_n + Q_{\text{пр}},$$

где C_c - стоимость собственно ТР: разборочно-сборочных и слесарных работ при заменах деталей;

C_d - стоимость заменяемых деталей;

C_n - стоимость недоиспользования ресурса заменяемых деталей;

$Q_{\text{пр}}$ - убытки, связанные с простоем оборудования при проведении ТР.

Если ТР планируется производить в периоды технологических простоев, то из расчета $P_{\text{тр}}$ исключаются убытки $Q_{\text{пр}}$, связанные с этими простоями во время работы.

Кроме того, принимаем, что стоимости замены детали $C_3 = C_c + C_d$ при отказе и ТР одинаковы.

Экономический эффект от ТР определяется предотвращенным убытком за рассматриваемый период, выраженный уменьшением потерянной прибыли

$$\mathcal{E}_{\text{до}} = N_n (C_n - C_n) t_n K_{oi}$$

где N_n - объем добытой продукции (или выполненной работы), производимой с помощью данного оборудования за единицу времени (например, тонн нефти за один час, т/ч);

C_n, C_n - соответственно цена и полная себестоимость объема продукции, манат/т;

t_n - время, затрачиваемое на проведение ТР, ч;

K_{oi} - число отказов i -ой детали, предотвращенных за рассматриваемый период за счет ТР.

Экономический эффект от замен деталей при плановых ТР определится суммой предотвращенного убытка от простоя, который мог бы возникнуть в случае внезапного отказа с учетом стоимости недоиспользованного ресурса замененных деталей. Для исключения простоя нужно либо иметь резервирование основной системы, либо же проводить ТР в период технологических простоев.

Если же применяется резервное оборудование (например, буровые насосы), то в расходах на ТР должны быть учтены дополнительные годовые расходы на амортизацию этого оборудования. Например, в увязке с технологическими простоями ТР буровых насосов экономически оправдан, если стоимость недоиспользованных ресурсов заменяемых деталей меньше затрат, вызванных отказами этих деталей во время бурения скважины, т.е. затрат от простоя буровой установки в целом.

С увеличением периода ТР стоимость недоиспользования ресурса заменяемых деталей уменьшается, а вероятность отказов (и, следовательно, вероятность убытков от простоев) увеличивается.

Таким образом, решение задачи установления оптимальной наработки до ТР сводится к классическому случаю - нахождению времени, соответствующего минимальному значению суммы двух функций: убывающей $C_{\text{нр}}(t)$ и возрастающей $Q_{\text{нр}}(t)$.

$$\psi(t) = C_{\text{нр}}(t) + Q_{\text{нр}}(t) \rightarrow \min,$$

где $C_{\text{нр}}(t)$ - стоимость недоиспользования ресурса заменяемых быстроизнашивающихся деталей (с учетом стоимости разборочно-сборочных и слесарных работ).

Убытки от простоя оборудования в любой момент времени

$$Q_{\text{нр}} = C_{\text{нр}} \cdot \tau \cdot q(t), \quad (9.43)$$

где $C_{\text{нр}} = C_{\text{уб}} + C_{\text{бр}}$ - стоимость одного часа простоя;

τ - длительность простоя, ч;

$q(t)$ - вероятность отказа в момент t ;

$C_{\text{бр}}$ - стоимость 1 ч работы буровой бригады;

Q - средний дебит одной скважины, т/сутки;

$C_{\text{уб}} = \frac{Q}{24} C_{\text{сн}}$ - стоимость недовыпуска продукции (проходки) за 1 ч;

$C_{\text{сн}}$ - себестоимость 1 т нефти.

В работе [30], исходя из выражения (9.43) и учитывая, что $1 - q(t) = P(t)$ и $P(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)}$ (где $f(t)$ - плотность распределения отказов детали при наработке t), получено выражение для определения интенсивности отказов при наработке t .

$$\lambda(t) = \frac{C_3}{C_{np} \cdot \tau \bar{T}}. \quad (9.44)$$

Вычислив из (9.44) значение оптимальной интенсивности отказов, из выражения $\lambda(t)$ для принятого закона распределения времени безотказной работы и его параметров (см. раздел 3.2) определится оптимальное время проведения ТР.

Однако, если распределение времени безотказной работы рассматриваемого оборудования подчиняется экспоненциальному закону и $\lambda = const$, то выполнение плановых ТР оказывается нецелесообразным [27]. В этом случае наиболее эффективным является проведение диагностики (контрольных технических осмотров). Как показано А.Л.Райкиным, периодические осмотры позволяют своевременно устранять обнаруживаемые при этом повреждения, могущие привести к преждевременным отказам, и в силу этого обладают восстанавливающим эффектом.

Поэтому эффективным с точки зрения минимизации затрат на ТО и ТР является проведение периодического контроля технического состояния деталей и сборочных единиц ответственного назначения, в том числе в периоды повторных демонтажно-монтажных работ и технологических простоев.

В табл.9.3 приведены данные о затратах времени на контрольные осмотры, ТО и ТР, а также устранение повреждений и отказов гидравлической части буровых насосов.

В данном случае характерными переменными факторами, определяющими результаты обработки статистических данных, являются показатели: x_1 - время на разборку; x_2 - время на технический контроль и обнаружение отказов; x_3 - время на подготовку запасных деталей; x_4 - время на сборку. Каждый из факторов x_1, x_2, x_3, x_4 можно рассматривать как отдельный признак. Корреляционный анализ позволил выявить влияние этих факторов на результативный фактор (трудоемкость ТО и ТР) y и получить его количественную оценку.

Таблица 9.3.

Данные о затратах времени на контрольные осмотры и устранение отказов гидравлической части буровых насосов

Номер выборки	Значение переменных факторов, мин				Значение результивного фактора, мин		Величина погрешности, %
	Время на разборочные работы x_1	Время на технический контроль и обнаружение отказов x_2	Время на подготовку запасных деталей x_3	Время на замену и сборочные работы x_4	теоретического y_t	опытного y_0	
1	31	21	10	48	125	127,60	1,53
2	34	23	10	54	141	141,72	0,42
3	38	24	11	55	151	149,68	0,78
4	40	24	12	55	158	155,60	1,41
5	42	25	13	56	159	161,63	1,55
6	43	26	15	58	172	173,43	0,84
7	44	26	15	59	179	177,14	1,09
8	44	27	16	63	190	189,49	0,30
9	46	28	16	68	208	202,51	3,23
10	48	31	18	74	217	221,01	2,36

Параметры уравнения регрессии находились из условия, при котором погрешность была бы минимальной. В результате вычислений по установленным значениям параметров x_1, x_2, x_3, x_4 (см. табл.9.3) получена математическая модель для прогнозирования результативного фактора - трудоемкости (чел.-мин) проведения контроля технического состояния, ТО и ТР с устранением отмеченных при контроле повреждений и отказов.

$$y = -18,781 + 0,965x_1 - 2,629x_2 + 3,987x_3 + 2,746x_4.$$

Достоверность переменных факторов подтверждается сопоставлением опытных значений y_0 с теоретическими значениями y_t результативного фактора (см. табл.9.3).

9.3.3. Оценка остаточного межремонтного ресурса оборудования

Как было отмечено, надежность отдельных видов оборудования обеспечивается не только при изготовлении и сборке на заводе-изготовителе, но и при периодически производимом демонтаже-монтаже. Поэтому монтажепригодность рассматривается как один из основных факторов, оказывающих влияние на надежность нефтепромыслового оборудования, и в замкнутом цикле обеспечения эксплуатационной надежности в указанных случаях должны быть также учтены и действия, связанные с периодически повторяющимся их монтажом.

При проведении после очередного демонтажа повторного (полного или частичного) монтажа возникает также необходимость в дополнительной оценке межремонтного ресурса, так как часть его (T_p) фактически использована в период работы оборудования от завершения монтажа на точке эксплуатации до демонтажа (рис.9.6а) [30].

Для многих видов механических систем функция интенсивности отказов $\lambda(t)$ является возрастающей. Как было отмечено, эта функция может быть достаточно точно аппроксимирована как

$$\lambda(t) = a + bt. \quad (9.45)$$

Так как к моменту демонтажа оборудование после очередного ремонта проработало определенное время t_1 (рис.9.6б), то вероятность безотказной работы к концу межремонтного периода можно представить в виде

$$P(t_1 + T'_{\text{мр}}) = \exp \left[- \int_0^{t_1 + T'_{\text{мр}}} \lambda(t) dt \right], \quad (9.46)$$

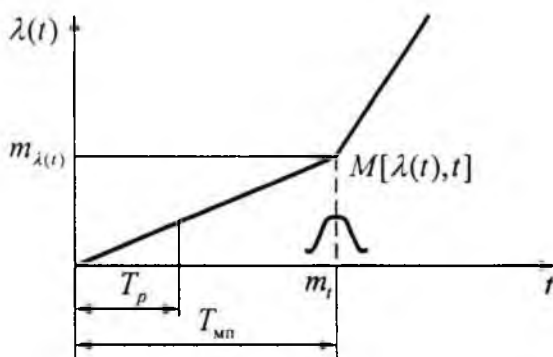
где $t_1 = T_p \cdot n$;

T_p - время работы после завершения монтажа оборудования и до очередного демонтажа;

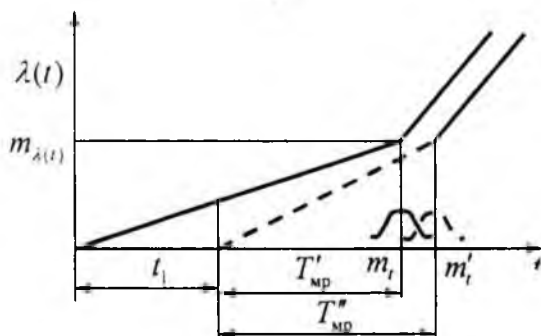
n - число выполненных на данный момент циклов монтаж-демонтаж;

$T'_{\text{мр}}$ - время до очередного планового ремонта (остаточный межремонтный ресурс).

Вероятностно-статистические характеристики безотказности для определения остаточного межремонтного ресурса оборудования при периодически проводимом демонтаже-монтаже.



а)



б)

Рис.9.6.

Учитывая, что все обнаруженные в процессе очередного монтажа отказы и повреждения устраняются, то $P(t_1) = 1$.

А так как $P(t_1 + T'_{\text{мр}}) = P(t_1) \cdot P\left(\frac{T'_{\text{мр}}}{t_1}\right) = P_n$, (где P_n - требуемый (нормируемый) уровень надежности), то и $P(T'_{\text{мр}}) = P_n$.

Из выражения (9.46) получим

$$P\left(\frac{T'_{\text{мр}}}{t_1}\right) = \exp\left[-\int_0^{t_1 + T'_{\text{мр}}} \lambda(t) dt\right]. \quad (9.47)$$

Здесь $P\left(\frac{T'_{\text{мр}}}{t_1}\right) = P_n$, так как к началу работы оборудования после завершения очередного монтажа $P(t_1) = 1$.

Необходимо однако учитывать, что характер возрастания по времени $\lambda(t)$ после очередного монтажа может измениться, но в любом случае, в связи с заменой ряда отказавших деталей, это не приведет к уменьшению остаточного межремонтного ресурса, т.е. $T''_{\text{мр}} \geq T'_{\text{мр}}$ (где $T''_{\text{мр}}$ - время до очередного планового ремонта с учетом замены ряда деталей). При этом дальнейшая эксплуатация оборудования возможна при условии, что $T_p \leq T'_{\text{мр}}$ или $t_1 + T_p \leq T_{\text{мп}}$.

Коэффициенты a и b функции (9.45) определяются на основании опыта эксплуатации. Уровень требуемой вероятности безотказной работы можно принять с учетом рекомендаций работы [11].

Если принять, что $T''_{\text{мр}} \approx T'_{\text{мр}}$, то выражение для определения $T''_{\text{мр}}$ может быть представлено в виде

$$\int_{t_1}^{t_1 + T'_{\text{мр}}} \lambda(t) dt = -\ln P_n. \quad (9.48)$$

Подставляя в формулу (9.48) выражение (9.45), после интегрирования и преобразований получим

$$T''_{\text{мр}} = -\frac{a + bt_1}{b} + \sqrt{\frac{(a + bt_1)^2}{b} - \frac{2 \ln P_n}{b}}. \quad (9.49)$$

Если интенсивность отказов описывается степенной функцией, как это характерно для распределения Вейбулла (см. раздел 3.2),

то

$$\lambda(t) = amt^{m-1}, \quad (9.50)$$

где a и m - параметры распределения Вейбулла; возрастающая по времени интенсивность отказов имеет место при $m > 1$.

В данном случае, подставляя в формулу (9.48) выражение (9.50), после интегрирования и преобразований получим

$$T_{\text{мр}}'' = \sqrt[m]{t_1^m - \frac{1}{a} \ln P_n} - t_1. \quad (9.51)$$

Если по результатам оценки остаточного межремонтного ресурса окажется, что $T_p > T_{\text{мр}}''$ ($t_1 + T_p > T_{\text{мр}}''$), то планировать эффективное использование данного оборудования возможно за счет дополнительных мер (см. раздел 2.4) с целью обеспечения его эксплуатации при $T_p \approx T_{\text{мр}}''$. В противном случае, потребуются внесение изменения в межремонтную структуру, т.е. отправка оборудования в ремонт до истечения его ресурса до капитального ремонта.

Межремонтный цикл эксплуатации оборудования охватывает все виды ТО, текущий и агрегатно-узловой ремонты с учетом их периодичности и завершается капитальным ремонтом. Так как на применяемую систему ТО и Р оказывают значительное влияние периодически проводимые демонтно-монтажные работы отдельных видов оборудования с перебазировкой агрегатов на новое место эксплуатации, то система ТО должна быть не только увязана с периодами использования оборудования и технологией выполняемых работ, но и включать дополнительное предэксплуатационное ТО (см. рис. 9.2).

9.4. Оценка нештатных ситуаций при текущих ремонтах

Как отмечалось, надежность восстанавливаемого объекта в значительной мере зависит от его ремонтпригодности, в частности от среднего времени восстановления.

Для восстановления в условиях эксплуатации первоначального ресурса и рабочих функций машин и агрегатов наряду с техническим обслуживанием предусматривается своевременное выполнение текущих ремонтов. При этом виде ремонта производится, как правило, частичная разборка оборудования для замены изношенных деталей; восстановление при необходимости работоспособности отдельных составных частей; сборка и регулировка сопряжений.

Разборка оборудования при ремонтах является одним из наиболее трудоемких и специфичных процессов. Так, по данным

С.Г.Бабаева [6] на долю разборочных работ приходится до 50% общей трудоемкости текущих ремонтов нефтепромыслового оборудования.

Характерная особенность разборочных процессов при ремонтах технических систем заключается в их непредсказуемости. Это связано с тем, что при демонтаже и разборке составных частей оборудования зачастую возникают определенные осложнения (нештатные ситуации): непредвиденные разрушения соединений, поломки деталей, остаточные деформации и др. Как результат, отмечается непредусмотренное увеличение трудоемкости и стоимости текущих ремонтов.

Число штатных ситуаций, являясь случайными величинами, принимают целые неотрицательные значения $0, 1, 2, \dots, m$.

Известно, что для подобных дискретных величин чаще всего применяют распределение Пуассона (см. раздел 3.1). Случайная величина ξ считается распределенной по закону Пуассона, если вероятность того, что она примет определенное значение m , выражается формулой

$$P_m = P(\xi = m) = \frac{\bar{a}^m}{m!} e^{-\bar{a}}$$

где P_m - вероятность появления числа событий (штатных ситуаций) m в заданном интервале времени;

$\bar{a} > 0$ - параметр распределения - среднее число (математическое ожидание) событий, приходящееся на принятый интервал времени.

В виде примера ниже приводятся результаты статистических исследований частоты возникновения осложнений при текущих ремонтах буровых насосов типа У8-6М, выполненные на основе статистических данных.

Известно, что работа буровых насосов протекает в тяжелых условиях. Перекачиваемая промывочная жидкость содержит абразивные частицы, а нередко и различные химические реагенты, агрессивно воздействующие на детали гидравлической части насосов. При работе насосов неизбежны также кратковременные перегрузки, вызванные осложнениями и авариями при бурении скважин. В этих условиях работы насосов вероятность возникновения при ремонтах штатных ситуаций возрастает. В то же время текущие ремонты насосов стремятся производить при спуско-подъемных операциях, во время которых буровые насосы не работают. Из-за

ограниченности времени в эти периоды, устранение нештатных ситуаций вызывает большие затруднения.

С целью анализа частоты возникновения осложнений при текущих ремонтах, на базе статистических данных о 600 текущих ремонтах буровых насосов типа У8-6М, были составлены 30 групп, каждая из которых содержала сведения о 20 ремонтах. Общее число нештатных ситуаций при текущих ремонтах оказалось равным 20, что составляет 3,3% от суммарного числа ремонтов. Относительно малое число нештатных ситуаций в данном случае объясняется низкими наработками до отказа деталей, и отсутствием по этой причине в сопряжениях деталей развитых процессов заедания и схватывания.

Установлено, что осложнения при ремонтах преимущественно связаны с заменой деталей гидравлической части насосов: клапанов, поршней, цилиндрических втулок, штоков и их уплотнений. Имели место поломки и коррозия крепежных деталей, смятие и схватывание контактных поверхностей (седло клапана) и др. Максимальное число нештатных ситуаций в группах составило $x_i = 4$ (табл. 9.4).

Таблица 9.4

Распределение осложнений при ремонтах буровых насосов по группам

интервалов k	Число		Теоретическое число групп m'_i	Критерий χ^2
	осложнений x_i	групп m_i		
1	0	18	18,30	0,01
2	1	7	9,15	0,66
3	2	3	2,29	0,17
4	3	1	0,38	0,38
5	4	1	0,05	0,02
Σ		30	30,17	1,24

Из всех $N = 30$ групп были выбраны группы с числом осложнений при ремонтах насосов, встречающихся 0, 1, 2, 3, 4 раз. При этом первая строка табл. 9.4 означает, что в 18 группах не было ни одного осложнения при ремонтах, вторая строка - в 7 группах было отмечено по одному осложнению и т.д.

Для проверки нулевой гипотезы о соответствии выборочного распределения закону Пуассона определяется средневзвешенное число осложнений при ремонтах буровых насосов

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i m_i}{N},$$

где i - номер группы; N - число групп; k - число интервалов.

По данным табл. 9.4 определяем $\bar{x} = 0,50$, соответственно $e^{-0,50} = 0,61$.

Теоретическое число групп с указанным выше количеством осложнений при ремонтах (частоты) m'_i вычисляется исходя из выражения

$$m'_i = Ne^{-\bar{x}} \frac{\bar{x}^{x_i}}{x_i!}.$$

Затем оценивается близость эмпирического и теоретического распределений по критерию согласия Пирсона (см. табл. 9.4)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - m'_i)^2}{m_i}.$$

Нулевая гипотеза о соответствии выборочного распределения теоретическому закону, проверяется путем сравнения результатов вычислений (см. табл. 9.4) с табулированным значением χ^2 [32] для принятого уровня значимости α и числа степеней свободы k . Для рассматриваемого случая находим критическое значение критерия $\chi^2_{0,05} = 7,82$, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k_1 = k - 2 = 3$. Так как, условие $\chi^2 \leq \chi^2_{\alpha}$ выполняется, то расхождение между эмпирическим и теоретическим распределениями можно считать случайным.

Несмотря на применение при ремонтах буровых насосов съемников и приспособлений для извлечения деталей гидравлической части, время на их текущий ремонт в случае возникновения нештатных ситуаций значительно возрастает. В связи с этим, интерес представляет исследование распределения затрат времени на разборку с целью замены деталей гидравлической части.

В табл. 9.5 приведены результаты группирования статистических данных, эмпирические частоты, а также эмпирическая и теоретическая функции распределения по выборке ($N = 70$) о затратах

Таблица 9.5

Результаты определения эмпирической и теоретической функций распределения

Интервал времени разборки, мин.	Середина интервала, мин	Количество случаев Δn_i	$n_i = \sum_{i=1}^{i-1} \Delta n_i$	Функция распределения	
				Эмпирическая $F_n(\tau_p) = \frac{n_i}{N}$	Теоретическая (см. формулу 9.52)
15-25	20	2	0	0	0,062
25-35	30	5	2	0,029	0,111
35-45	40	8	7	0,100	0,184
45-55	50	13	15	0,214	0,279
55-65	60	10	28	0,400	0,397
65-75	70	8	38	0,543	0,520
75-85	80	6	46	0,657	0,643
85-95	90	5	52	0,743	0,753
95-105	100	4	57	0,814	0,844
105-115	110	3	61	0,871	0,906
115-125	120	1	64	0,915	0,946
125-135	130	2	65	0,929	0,979
135-145	140	2	67	0,957	0,988
145-155	150	1	69	0,986	0,995
Σ		$N=70$			

времени на разборку гидравлической части τ_p при текущих ремонтах насосов У8-6М в условиях бурения. Значения теоретической функции распределения вычислялись по формуле:

$$F(\tau_p) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\tau_p - a}{\sigma}\right), \quad (9.52)$$

где a и σ - параметры нормального распределения;

$\Phi(z)$ - нормированная функция нормального распределения.

Ликвидация нештатных ситуаций требует естественно больших затрат времени на текущие ремонты оборудования. В результате, с увеличением в выборке числа осложнений при разборках, степень соответствия эмпирического распределения нормальному закону ухудшается. По этой причине для анализа была принята выборка с наибольшим количеством нештатных ситуаций. В 70 рассмотренных случаях разборок гидравлической части буровых насосов У8-6М было отмечено 6 нештатных ситуаций, что составляет 8,6% от общего числа разборок.

По результатам представленных в табл. 9.5 данных среднее время, затрачиваемое на разборку $\bar{\tau}_p$, среднее квадратическое отклонение σ_p и коэффициент вариации V равны соответственно: $\bar{\tau}_p = 68,4$ мин.; $\sigma_p = 31,5$ мин.; $V = 0,46$.

По известной методике [32] была дана также оценка отклонению эмпирического распределения от нормального закона путем определения меры асимметрии: $\alpha = 0,275$. Так как $\alpha > 0$, то лишний раз подтверждается, что мода распределения сдвинута влево.

Проверка гипотезы о соответствии эмпирического распределения теоретическому закону нормального распределения производилась по критерию λ Колмогорова.

Для вычисления величины критерия λ предварительно определяются теоретические $F(\tau_p)$ и эмпирические $F_n(\tau_p)$ функции предполагаемого закона распределения. Затем по максимальной разности значений этих функций (модуля разности D_N) определяется λ по зависимости:

$$\lambda = \max |F_n(\tau_p) - F(\tau_p)| \cdot \sqrt{N} = D_N \cdot \sqrt{N}.$$

Исходя из вычисленного максимального значения λ по табличным данным [32] определяется вероятность $P(\lambda)$ того, что $D_N \cdot \sqrt{N} \geq \lambda$.

Если вероятность $P(\lambda)$ мала ($<0,1 \dots 0,05$), то расхождение между $F_n(\tau_p)$ и $F(\tau_p)$ считается существенным. При достаточно больших $P(\lambda)$ гипотеза принимается.

По результатам расчетов (см. табл.9.5) были определены максимальное значение модуля разности $D_N = 0,084$ и соответствующие значения $\lambda = 0,703$ и вероятности $P(\lambda) = 0,7$. Так как вероятность $P(\lambda)$ имеет достаточно высокое значение, то гипотеза о соответствии распределения времени на разборку деталей и сборочных единиц гидравлической части буровых насосов нормальному закону принимается.

Для уменьшения числа нештатных ситуаций при ремонтах необходимо дальнейшее совершенствование комплекса приспособлений для замен отказавших деталей. В частности, применяемых для ремонта гидравлической части буровых насосов типа У8-6М: съемников затвора и седла клапана, а также других деталей насоса; приспособления для извлечения штока с поршнем и цилиндровой втулки; приспособления для выталкивания корпуса уплотнения штока и др. Необходимо также значительное повышение ресурса быстроизнашивающихся деталей за счет подбора соответствующих материалов, защитных и твердосмазочных покрытий, а также осуществления необходимых конструкторских и технологических мероприятий.

9.5. Определение состава запасных частей для обеспечения необходимого уровня надежности оборудования

9.5.1. Определение номенклатуры запасных частей

Номенклатура запасных частей представляет собой перечень номеров и наименований деталей и сборочных единиц, составленных в виде спецификации в определенной последовательности, с учетом технической документации заводов-изготовителей. Она включает: детали, сборочные единицы и агрегаты механических систем, комплекты и составные части электрооборудования, пневмо- и гидрооборудования, приборы, уплотняющие и другие элементы.

В номенклатуру запасных частей прежде всего, включаются: быстроизнашивающиеся и периодически заменяемые детали и сбо-

рочные единицы (например, детали гидравлической части насосов); элементы машин, ресурс которых меньше межремонтного или полного ресурса агрегатов; элементы, отказы которых в эксплуатации могут иметь внезапный характер; детали, повторно не используемые при техническом обслуживании и текущих ремонтах (различного рода прокладки); элементы, которые могут быть повреждены или утеряны в эксплуатации (болты, винты, гайки и др.).

В идеальном случае комплект запасных частей представляет собой полный набор исходных элементов системы, которые изнашиваются или могут внезапно отказывать и должны заменяться в процессе эксплуатации системы. Так как стоимость реализации различных вариантов номенклатуры запасных частей будет различаться, то задача выбора состава набора запасных частей может быть сформирована и решена как задача оптимизации затрат на номенклатуру запасных частей при определенных ограничениях. Постановка задачи наиболее целесообразна на этапе проектирования системы. Однако, на практике на этом этапе производится лишь ориентировочное выявление номенклатуры запасных частей с окончательным расчетным уточнением ее на основе результатов испытания опытных образцов и статистических данных по изделию-аналогу. При этом наиболее распространенный расчетный метод выбора номенклатуры запасных частей сводится к следующему [49]:

1. Определяется математическое ожидание количества замен (отказов) составных частей за время эксплуатации

$$a = nN\lambda T, \quad (9.53)$$

где N - число изделий, на которые рассчитываются запасные части;

n - количество данного вида составных частей на одном изделии;

λ - интенсивность отказов (замен) данного вида составной части;

T - время эксплуатации, на которое рассчитываются запасные части.

2. Вычисляются затраты, связанные с заменой составных частей

$$C = (C_{об} + aC_3)/N,$$

где $C_{об}$ - стоимость оборудования (приспособления);

C_3 - стоимость одного элемента (запасной части).

рочные единицы (например, детали гидравлической части насосов); элементы машин, ресурс которых меньше межремонтного или полного ресурса агрегатов; элементы, отказы которых в эксплуатации могут иметь внезапный характер; детали, повторно не используемые при техническом обслуживании и текущих ремонтах (различного рода прокладки); элементы, которые могут быть повреждены или утеряны в эксплуатации (болты, винты, гайки и др.).

В идеальном случае комплект запасных частей представляет собой полный набор исходных элементов системы, которые изнашиваются или могут внезапно отказывать и должны заменяться в процессе эксплуатации системы. Так как стоимость реализации различных вариантов номенклатуры запасных частей будет различаться, то задача выбора состава набора запасных частей может быть сформирована и решена как задача оптимизации затрат на номенклатуру запасных частей при определенных ограничениях. Постановка задачи наиболее целесообразна на этапе проектирования системы. Однако, на практике на этом этапе производится лишь ориентировочное выявление номенклатуры запасных частей с окончательным расчетным уточнением ее на основе результатов испытания опытных образцов и статистических данных по изделию-аналогу. При этом наиболее распространенный расчетный метод выбора номенклатуры запасных частей сводится к следующему [49]:

1. Определяется математическое ожидание количества замен (отказов) составных частей за время эксплуатации

$$a = nN\lambda T, \quad (9.53)$$

где N - число изделий, на которые рассчитываются запасные части;

n - количество данного вида составных частей на одном изделии;

λ - интенсивность отказов (замен) данного вида составной части;

T - время эксплуатации, на которое рассчитываются запасные части.

2. Вычисляются затраты, связанные с заменой составных частей

$$C = (C_{об} + aC_3)/N,$$

где $C_{об}$ - стоимость оборудования (приспособления);

C_3 - стоимость одного элемента (запасной части).

3. Находится математическое ожидание времени восстановления одного изделия в часах за время эксплуатации $\bar{\tau}_s$ путем замены составных частей

$$\bar{\tau}_s = a \tau'_s / N, \quad (9.54)$$

где τ'_s - время восстановления изделия путем замены составной части.

Если затраты C и среднее время восстановления $\bar{\tau}_s$ не превышают заданных, то запасная часть включается в номенклатуру, в противном случае требуются дополнительные разработки по обеспечению требуемых показателей.

9.5.2. Определение потребности в запасных частях

Наиболее простой способ определения потребности в запасных частях состоит в делении установленного срока службы элемента на величину его наработки на отказ [49]

$$m = \frac{T_{cl}}{T_o}, \quad (9.55)$$

где T_{cl} - установленный срок службы элемента;

T_o - наработка на отказ элемента.

Уравнение (9.55) позволяет определить требуемое среднее количество запасных частей. Однако, само среднее значение не всегда оказывается правильным, поскольку существует определенная вероятность того, что в течение какого-то конкретного периода времени может потребоваться больше, чем среднее количество запасных частей. Поэтому для более точного метода расчета потребности в запасных частях вводится доверительный интервал. В этом случае расчет запасных частей производится по формуле

$$m = \lambda T + U_\gamma \sqrt{\lambda T}, \quad (9.56)$$

где λ - интенсивность отказов;

T - время, на которое рассчитывается потребность в запасных частях;

U_γ - квантиль функции нормального распределения для заданной вероятности γ ($\gamma = 0,9 \dots 0,99$). Значения U_γ табулированы [49].

Однако результаты, получаемые при использовании данного подхода, не являются точными и чаще всего дают завышенные зна-

чения потребности в запасных частях. Поэтому данный способ применим лишь для ориентировочного определения потребности в запасных частях. В основном это целесообразно на стадии проектирования оборудования с последующим уточнением по результатам испытаний опытных образцов машин.

Как было выше отмечено (см. раздел 3.1), для анализа имеющих место дискретных случайных величин, наибольшее применение нашли закон распределения Пуассона и биномиальное распределение.

Для разграничения области применения указанных законов распределения можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в работе [15] для планирования испытаний опытных образцов оборудования методом фиксированного объема.

Если вероятность появления отказов q в выборке объемом n постоянна и соблюдаются условия: $n \geq 20$ и $n > 0,1N$, где N - возможный объем испытаний (генеральная совокупность наблюдений или партия изделий), то вероятность получения соответствующего уровня надежности по результатам n испытаний определяют по биномиальному закону

$$P(x \leq c) = \sum_{m=0}^{m=c} C_n^m q_1^m (1 - q_1)^{n-m} = \beta, \quad (9.57)$$

где c и m - соответственно допустимое число отказов, и число отказов в выборке объемом n ;

$$C_n^m = n! / [m!(n-m)!];$$

q_1 - допустимая вероятность отказа изделия;

β - риск заказчика.

Если вероятность появления отказов q в выборке объемом n постоянна и мала, т.е. произведение $nq = 0,1 \dots 2,0$, то вероятность соответствия уровня надежности по результатам n испытаний определяют, используя закон Пуассона

$$P(x \leq c) = \sum_{m=0}^{m=c} \frac{e^{-nq_1} (nq_1)^m}{m!} = \beta. \quad (9.58)$$

Приведенные зависимости для планирования испытаний методом фиксированного объема, применимы и для ориентировочного определения потребности в запасных частях. При известном значении величины q_1 (с учетом β) можно определить число отказов (необходимое количество запасных частей) по результатам n испы-

таний. При этом можно использовать приведенные в работе [49] табулированные данные, содержащие значения n , q , β и $c = m$.

Известно, что в теории надежности закон распределения Пуассона используется для случая простейшего потока отказов, когда вероятность события (отказа) мала [$P(n) \leq 0,1$]. Модель расчета потребности в запасных частях при этом, выражается через вероятность безотказной работы $P(t)$ (в случае постоянной функции интенсивности отказов)

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} = \text{const}.$$

Вероятность появления отказа в этом случае можно выразить с помощью распределения Пуассона в виде

$$\sum_{n=1}^{\infty} P(n) = e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} + \frac{1}{2!} (\lambda t)^2 e^{-\lambda t} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} = 1. \quad (9.59)$$

В выражении (9.59) первый член является вероятностью события, что до времени t не будет ни одного отказа, второй член - вероятностью события, что случится один отказ, и последний член - вероятностью события, что за период t произойдет n отказов

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}. \quad (9.60)$$

То есть последний член в выражении (9.59) представляет собой дискретное распределение Пуассона с параметром $a = \lambda t$.

На этой основе можно рассчитать необходимое число запасных частей для отдельных элементов системы, для которых $\lambda(t) = \text{const}$. В работе [15] для этой цели предложена номограмма и соответствующая зависимость

$$P(r)_i = \sum_{r=0}^r \frac{(N n_i \lambda_i t)^2}{r!} e^{-N n_i \lambda_i t} = P_n, \quad (9.61)$$

где $P(r)_i$ - вероятность того, что будет r или меньше запросов на запасную часть i -го элемента;

N - число рассматриваемых систем;

n_i - число элементов в системе;

λ_i - интенсивность отказов i -го элемента; $\lambda_i = \text{const}$;

t - время работы системы (i -го элемента);

r_i - число запасных частей для i -го элемента;

P_n - требуемая надежность.

Так как математическое ожидание $M(n)$ и дисперсия $D(n)$ при пуассоновском потоке отказов $M(n) = D(n) = \lambda t$, то это свойство распределения Пуассона часто применяется для решения вопроса о соответствии данному закону некоторого потока отказов и вообще любых случайных величин, если их статистические величины $M^*(t)$ и $D^*(t)$ известны. При существенном же различии математического ожидания и дисперсии, а также в случаях, когда $P(n) > 0,1$, использование распределения Пуассона не рекомендуется.

Таким образом, область применения распределения Пуассона для определения потребности в запасных частях связана с вероятностью появления n независимых событий (отказов) в данном интервале времени t , когда отказы происходят с постоянной интенсивностью λ .

Современные нефтепромысловые машины и оборудование (например, передвижные подъемные установки) представляют собой сложные системы, состоящие из ряда составных частей: механической части, пневмо- и гидросистем, электрооборудования и др.

Пусть подобная система (оборудование) содержит N различных видов составных частей и каждый i -ый вид ($i=1,2,\dots,N$) включает n_i одинаковых заменяемых элементов (деталей и сборочных единиц); причем, отказ любого элемента возникает при предусмотренных плановых ТО и ТР или неплановых ремонтах из-за внезапных отказов, когда элемент признается непригодным для дальнейшей эксплуатации.

За основу разрабатываемой методики определения оптимального состава запасных частей для текущих ремонтов составных частей оборудования примем рекомендации, изложенные в работе [15].

Рассмотрим элемент i -го типа одной из составных частей системы.

Если принять, что вероятность отказа элемента i -го типа в межремонтный период $T_{\text{мп}}$ равна q_i , то тогда вероятность появления m_i отказов элементов i -го типа за этот период в соответствии с биномиальным законом распределения запишется в виде

$$P_i(T_{\text{мп}}) = C_{n_i}^{m_i} q_i^{m_i} (1 - q_i)^{n_i - m_i}. \quad (9.62)$$

Так как m_i является случайной величиной, то потребность в запасных частях (заменяемых элементах) будет удовлетворена, если выполняется условие

$$m_i \leq m_{\text{зп}}, \quad (9.63)$$

где m_{zi} - число имеющихся запасных частей i -го типа.

Вероятность обеспечения этого уровня является функцией распределения случайной величины m_i и исходя из выражения (9.63) определяется по формуле

$$P(m_i \leq m_{zi}) = \sum_{m_i=0}^{m_{zi}} C_{n_i}^{m_i} q_i^{m_i} (1 - q_i)^{n_i - m_i}. \quad (9.64)$$

Количество запасных частей следует считать достаточным, если условие (9.63) по всем заменяемым элементам выполняется. Тогда для системы, состоящей из различных видов составных частей, вероятность обеспечения этого условия запишется в виде

$$P[N(m_i \leq m_{zi})] = \prod_{i=1}^N \sum_{m_i=0}^{m_{zi}} C_{n_i}^{m_i} q_i^{m_i} (1 - q_i)^{n_i - m_i}. \quad (9.65)$$

Величина вероятности $P[N(m_i \leq m_{zi})]$ характеризует достаточность обеспечения системы запасными частями. Уровень этой вероятности рекомендуется задавать равным некоторой величине γ , значение которой в зависимости от важности оборудования выбирается в пределах 0,7...0,9 [15]. Например, для металлургических машин и агрегатов принимают: $\gamma = 0,9$ - для основного оборудования и $\gamma = 0,7...0,8$ - для вспомогательного оборудования и отдельно стоящих машин. При этом количество запасных частей определяется из условия

$$\prod_{i=1}^N \sum_{m_i=0}^{m_{zi}} C_{n_i}^{m_i} q_i^{m_i} (1 - q_i)^{n_i - m_i} \geq \gamma. \quad (9.66)$$

Это условие может быть выполнено при различных значениях вероятностей, входящих в состав левой части выражения (9.65). Наиболее рациональный вариант количественного состава запасных частей может быть определен, если ввести дополнительное условие. В качестве такого условия может рассматриваться требование минимальной стоимости запасных частей при обеспечении их достаточности, исключающей простои оборудования из-за отсутствия отдельных типов подлежащих замене деталей. Удовлетворение требования по минимальной стоимости исключает накопление не используемых запасных частей и снижает себестоимость продукции основных цехов.

Стоимость запасных частей определяется:

$$C_3 = \sum_{i=1}^N m_{3i} \cdot c_i, \quad (9.67)$$

где c_i - стоимость запасной части i -го типа.

Так как величины m_{3i} , определяемые из условия (9.66), могут изменяться в широких пределах, то и величина C_3 может принимать некоторое дискретное множество значений. Причем, среди этих значений всегда будет иметь место и минимальное значение, которое можно определить путем минимизации величины C_3 , принимая в качестве ограничения неравенство (9.66). Задача минимизации этой величины может быть решена на основе метода доминирующих последовательностей [15].

В общем виде задача формируется следующим образом. Стоимость запасных частей определяется соотношением (9.67). Задано ограничение на эффективность обеспечения системы запасными частями в виде неравенства (9.66). Необходимо найти такое значение вектора количественного состава запасных частей $\bar{m}_3^0 = (m_{31}^0; m_{32}^0; \dots; m_{3N}^0)$, при котором обеспечивается минимальное значение C_3 при выполнении ограничения (9.66), т.е. при заданной достаточности γ обеспечения системы запасными частями.

Метод построения доминирующей последовательности векторов представляется как упорядоченный многошаговый процесс. Для решения задачи в качестве начального выбирают вектор $\bar{m}_{3н} = (0; 0; \dots; 0)$, соответствующий отсутствию запасных частей. При этом эффективность обеспечения системы запасными частями в соответствии с (9.65) определится по формуле

$$P[N(m_i = 0)] = \prod_{i=1}^N (1 - q_i)^{n_i} \quad (9.68)$$

и численно равна вероятности безотказной работы заменяемых элементов.

На первом шаге предполагается, что состав запасных частей включает только один элемент i -го типа. Тогда приращение достаточности после первого шага составит

$$\eta_{1i} = \frac{P(m_i \leq 1) - P(m_i = 0)}{P(m_i = 0)} = \frac{P(m_i \leq 1)}{P(m_i = 0)} - 1$$

или с учетом стоимости элемента

$$n_{1i} = \frac{1}{c_i} \left[\frac{P(m_i \leq 1)}{P(m_i = 0)} - 1 \right]. \quad (9.69)$$

Из этого выражения определяется η_{1i} для каждого элемента i -го типа, находится максимальное $\eta_{1\max}$ и для соответствующего элемента принимается $m_i = 1$. При этом на первом шаге получается доминирующий вектор $\bar{m}_1$, в котором все компоненты $m_{1i} = 0$, кроме одного, соответствующего элементу, обеспечивающему достижение $\eta_{1\max}$, и равного единице.

При втором шаге оптимизации добавляется еще одна запасная часть и вычисляется приращение достаточности только для элементов того типа, для которых на первом шаге была введена запасная часть. Это позволяет определить $\eta_{2\max}$ и получить доминирующий вектор $\bar{m}_2$, в котором уже два компонента будут равны единице, а остальные равны нулю.

На произвольном k -ом шаге доминирующая последовательность векторов $\bar{m}_k$ строится на основе соотношения

$$\eta_{ki} = \frac{1}{c_i} \left[\frac{P(m_i \leq m_{ki})}{P(m_i \leq m_{(k-1)i})} \right]. \quad (9.70)$$

Из этого выражения находится $\eta_{ki\max}$ и определяется доминирующий вектор $\bar{m}_k$.

На каждом шаге проверяется достаточность обеспечения запасными частями по формуле (9.65) путем сравнения результатов с заданной γ . Задача считается решенной, если удовлетворяется соотношение (9.66).

9.6. Расчет потребности в запасных частях для текущего ремонта нефтепромысловых и буровых насосов

Известно, что основным видом ремонта, направленным на восстановление работоспособности оборудования в условиях эксплуатации, является текущий ремонт, при выполнении которого производятся замены отказавших и имеющих повреждения быстроизнашивающихся деталей и сборочных единиц. Так как затраты на текущие ремонты включаются в эксплуатационные расходы, то от их характера, объема и продолжительности в немалой степени

зависит себестоимость выпускаемой продукции или производимых работ.

В связи с этим, для уменьшения простоев нефтепромыслового оборудования в эксплуатации, важным является установление оптимальной потребности в запасных частях для текущих ремонтов машин и агрегатов. При этом первоочередной задачей является определение необходимого состава «возимого» комплекта запасных частей, который должен находиться непосредственно на точке эксплуатации для своевременной замены отказавших деталей и сборочных единиц. В частности, несвоевременное устранение отказов нефтепромысловых и буровых насосов, из-за отсутствия запасных деталей на точках эксплуатации, может привести к потере циркуляции промывочной жидкости, к снижению качества выполняемых работ, к осложнениям и авариям, ликвидация которых связана порой со значительными затратами времени и большим материальным ущербом.

Ниже, на основе изложенной в разделе 9.5.2 методики, представлены результаты расчетов по определению оптимального количества «возимого» комплекта запасных деталей гидравлической части нефтепромыслового насоса типа Н5-160 и бурового насоса типа У8-6М.

Детали и сборочные единицы гидравлической части нефтепромыслового и бурового насоса приняты в качестве объектов исследований исходя из их конструктивно-технологических особенностей и промысловых данных, указывающих на значительный расход запасных частей при текущих ремонтах. Этот выбор обусловлен, во-первых тем, что наряду с постепенными отказами, для этих деталей и сборочных единиц характерны и внезапные отказы, что определяет необходимость выполнения неплановых текущих ремонтов на точке эксплуатации; во-вторых, наработка до отказа гидравлической части насосов высокого давления чрезвычайно низка. Следовательно, задача прогнозирования потребности в указанных запасных деталях является весьма актуальной.

Нефтепромысловый насос типа Н5-160. При плановых текущих ремонтах гидравлической части плунжерных нефтепромысловых насосов высокого давления замене подлежат: клапаны, плунжеры, детали узла уплотнения плунжеров. Реже заменяются штоки (соединяющие плунжеры с крейцкопфами), которые имеют достаточно высокую наработку до отказа, так как непосредственно не контактируют с перекачиваемой под большим давлением средой.

Исходные данные для расчета необходимого количества запасных частей для текущих ремонтов насосов Н5-160 приведены в табл. 9.6. Заданная достаточность обеспечения насосов запасными частями $\gamma = 0,9$.

Таблица 9.6

Исходные данные для расчетов по насосу типа Н5-160

Показатели	Детали и сборочные единицы насоса			
	Плунжер	Уплотнение плунжера	Клапан	Шток с уплотнением
Количество деталей, подлежащих замене, n	3	3	6	3
Вероятность отказа деталей в межремонтный период, q (при $T = 250$ ч)	0,05	0,05	0,10	0,01
Стоимость деталей (сборочных единиц) c , тыс. манат	230	110	450	180

Для определения оптимального «возимого» состава запасных частей, в соответствии с приведенной выше методикой строим доминирующую последовательность для первого шага оптимизации и оцениваем достаточность обеспечения каждой из перечисленных в табл. 9.6 деталей и сборочных единиц насоса. С этой целью вначале определяем вероятности $P(m_i = 0)$ и $P(m_i \leq 1)$ для каждого из них по формуле (9.64).

$$P(m_i = 0) = (1 - q)^{n_i}.$$

Отсюда

$$P(m_1 = 0) = (1 - 0,05)^3 = 0,8574; \quad P(m_2 = 0) = (1 - 0,05)^3 = 0,8574$$

$$P(m_3 = 0) = (1 - 0,10)^6 = 0,5314; \quad P(m_4 = 0) = (1 - 0,01)^3 = 0,9703.$$

Строим доминирующую последовательность для первого шага оптимизации. Для этого определяем вероятность $P(m_i \leq 1)$ для каждой детали.

$$P(m_i \leq 1) = C_{n_i}^0 q_i^0 (1 - q_i)^{n_i} + C_{n_i}^1 q_i^1 (1 - q_i)^{n_i - m_i}.$$

При определении $P(m_i \leq 1)$ учитываем, что число сочетаний

из n_i по нулю: $C_{n_i}^0 = 1$. Так как $C_{n_i}^{m_i} = \frac{n_i!}{m_i!(n_i - m_i)!}$, а $0! = 1$.

В результате имеем:

$$\begin{aligned} P(m_1 \leq 1) &= C_3^0 q_1^0 (1 - q_1)^n + C_3^1 q_1^1 (1 - q_1)^{n-1} = \\ &= 0,8574 + 3 \cdot 0,05 \cdot 0,9025 = 0,9928 ; \\ P(m_2 \leq 1) &= 0,8574 + 3 \cdot 0,05 \cdot 0,9025 = 0,9928 ; \\ P(m_3 \leq 1) &= 0,5314 + 6 \cdot 0,10 \cdot 0,5905 = 0,8857 ; \\ P(m_4 \leq 1) &= 0,9703 + 3 \cdot 0,01 \cdot 0,9801 = 0,9997 . \end{aligned}$$

Приращение достаточности для каждого типа деталей находим по формуле (9.69):

$$\begin{aligned} \eta_{11} &= \frac{1}{c_1} \left[\frac{P(m_1 \leq 1)}{P(m_1 = 0)} - 1 \right] = \frac{1}{230} \left[\frac{0,9928}{0,8574} - 1 \right] = 0,0006866 ; \\ \eta_{12} &= 0,001436 ; \quad \eta_{13} = 0,001482 ; \quad \eta_{14} = 0,0001683 . \end{aligned}$$

Как видно, максимальное приращение соответствует деталям третьего типа - клапанам насоса. Следовательно, после первого шага оптимизации следует выбрать доминирующий фактор $\bar{m}_3^0 = (0,0,1,0)$, что указывает на необходимость наличия в комплекте запасных частей одного клапана.

Достаточность обеспечения этой запасной частью γ определяется по формуле (9.65)

$$\begin{aligned} P[4(m_i \leq 1)] &= (1 - 0,05)^3 \cdot (1 - 0,05)^3 \cdot [C_6^0 q_3^0 (1 - q_3)^6 + C_6^1 q_3^1 (1 - q_3)^5] \times \\ &\times (1 - 0,01)^3 = 0,8574 \cdot 0,8574 \cdot 0,8857 \cdot 0,9703 = 0,6318 . \end{aligned}$$

Так как это ниже требуемой ($\gamma = 0,9$), то необходимо проведение второго шага оптимизации.

На втором шаге построения доминирующей последовательности добавляем еще одну запасную часть и вычисляем приращение достаточности, пока для деталей третьего типа по формуле (9.70)

$$\begin{aligned} \eta_{23} &= \frac{1}{c_3} \left[\frac{P(m_3 \leq 2)}{P(m_3 \leq 1)} - 1 \right] = \frac{1}{450} \left[\frac{0,8857 + C_6^2 \cdot q_3^2 (1 - q_3)^4}{0,8857} - 1 \right] = \\ &= \frac{1}{450} \left[\frac{0,8857 + 15 \cdot 0,1^2 \cdot 0,90^4}{0,8857} - 1 \right] = 0,0002469 . \end{aligned}$$

Так как для других типов деталей на данной стадии расчета не было введено запасных частей, то их приращения достаточности остались без изменения.

Сравниваем приращения достаточности: 0,0006866; 0,001436; 0,0002469; 0,0001683. Как видно, максимальное приращение соответствует детали не третьего, а второго типа (уплотнению плун-

жера). Следовательно, после второго шага оптимизации доминирующий вектор будет иметь вид $\bar{m}_3^0 = (0, 1, 1, 0)$, что свидетельствует о необходимости наличия в запасе одного клапана и одного комплекта уплотнения плунжера. Достаточность обеспечения запасными частями при этом равна

$$P[4(m_i \leq 2)] = (1 - 0,05)^3 \cdot [C_3^0 q_2^0 (1 - q_2)^3 + C_3^1 q_2^1 (1 - q_2)^2] \times \\ \times 0,8857 \cdot (1 - 0,01)^3 = 0,8574 \cdot 0,9928 \cdot 0,8857 \cdot 0,9703 = 0,7315.$$

Это также меньше заданного ($\gamma = 0,9$) и поэтому необходим третий шаг оптимизации.

На третьем шаге оптимизации добавляем одну запасную часть и вновь вычисляем приращение достаточности η_{32} только на этот раз для деталей второго типа.

$$\eta_{32} = \frac{1}{c_2} \left[\frac{P(m_2 \leq 2)}{P(m_2 \leq 1)} - 1 \right] = \frac{1}{110} \left[\frac{0,9928 + C_3^2 \cdot q_2^2 (1 - q_2)}{0,9928} - 1 \right] = \\ = \frac{1}{110} \left[\frac{0,9928 + 1 \cdot 0,0025 \cdot 0,95}{0,9928} - 1 \right] = 0,000217.$$

Сравниваем приращения достаточности 0,0006866; 0,000217; 0,0002469; 0,0001683 и видим, что максимальное приращение соответствует детали первого типа (плунжеру). Доминирующий вектор после третьего шага оптимизации имеет вид $\bar{m}_3^0 = (1, 1, 1, 0)$, что свидетельствует о необходимости введения в состав запасных частей одного плунжера.

Достаточность обеспечения запасными частями при этом будет равна

$$P[4(m_i \leq 3)] = [C_3^0 q_1^0 (1 - q_1)^3 + C_3^1 (1 - q_1)^2] \cdot 0,9928 \cdot 0,8857 \cdot 0,9703 = \\ = 0,9928 \cdot 0,9928 \cdot 0,8857 \cdot 0,9703 = 0,8471.$$

Это по-прежнему меньше заданного γ и поэтому необходим четвертый шаг оптимизации, на котором вычисляем приращение достаточности η_{41} , только пока для деталей первого типа

$$\eta_{41} = \frac{1}{c_1} \left[\frac{P(m_1 \leq 2)}{P(m_1 \leq 1)} - 1 \right] = \frac{1}{230} \left[\frac{0,9928 + C_3^3 \cdot q_1^3 (1 - q_1)}{0,9928} - 1 \right] = 0,0000104.$$

Вновь сравниваем приращения достаточности (0,0000104; 0,000217; 0,0002469; 0,0001683) и видим, что максимальное приращение вторично соответствует детали третьего типа (клапану). Доминирующий вектор после четвертого шага имеет вид $\bar{m}_3^0 = (1, 1, 2, 0)$,

что свидетельствует о необходимости введения в состав запасных частей еще одного клапана.

Достаточность обеспечения запасными частями при этом будет равна

$$P[4(m, \leq 4)] = 0,9928 \cdot 0,9928 \cdot [0,8857 + C_6^2 q_3^2 (1 - q_3)^4] \cdot 0,9703 = 0,9412.$$

Это больше требуемой достаточности $\gamma = 0,9$.

Таким образом, определен оптимальный состав «возимого» комплекта запасных частей для рассматриваемого нефтепромыслового насоса типа Н5-160, который включает: два клапана, один плунжер и комплект его уплотнения.

По итогам расчетов установлена оптимальная потребность в запасных деталях (состав «возимого» комплекта запасных частей / количество данных деталей в насосе): плунжер - 1/3; уплотнение плунжера - 1/3; клапан - 2/6.

В состав запасных частей по результатам оптимизации не включена пара шток - уплотнение, что объясняется относительно более высоким ее сроком службы (примерно 4 ... 6 мес.).

Буровой насос У8-6М. В номенклатуру «возимого» комплекта запасных частей также включены четыре наименования деталей гидравлической части (см.табл. 9.7).

Таблица 9.7

Исходные данные для расчетов по насосу типа У8-6М

Показатели	Детали и сборочные единицы насоса			
	Поршень	Цилиндровая втулка	Клапан	Шток с уплотнением
Количество деталей, подлежащих замене, n	2	2	8	2
Вероятность отказа деталей в межремонтный период, q (при $T = 100$ ч)	0,15	0,10	0,15	0,05
Стоимость деталей (сборочных единиц) c , тыс. манат	210	520	480	290

По итогам расчетов установлена следующая оптимальная потребность в запасных деталях (состав «возимого» комплекта / количество данных деталей в насосе): поршень - 1/2; цилиндровая втулка - 1/2; шток с уплотнением - 1/2; клапан - 2/8.

Ясно, что установленные для насосов Н5-160 и У8-6М «возимые» комплекты запасных частей должны пополняться после каждого планового или непланового текущего ремонта насосов. Исходя из этого, не представляет трудности определение необходимого количества запасных частей на планируемый календарный период (месяц, квартал, год).

Среднее количество запасных частей для текущих ремонтов насосов $\bar{Z}$ за принятое календарное время их работы, можно определить (с учетом выражения (9.53)):

$$\bar{Z} = N_n T_k K_m \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i,$$

где N_n - число насосов, для которых определяется необходимое количество комплектов запасных частей;

T_k - календарное время работы насосов, ч; в годовом разрезе

$T_k = 8760$ ч;

K_m - коэффициент использования насосов по машинному времени;

n_i - количество деталей i -го типа;

λ_i - интенсивность отказов детали i -го типа, 1/ч;

$n_i \lambda_i$ - интенсивность отказов имеющихся в насосе деталей данного типа, 1/ч.

По данным ряда авторов коэффициент использования буровых насосов по машинному времени в бурении скважин колеблется в пределах 0,35...0,45. Исходя из этого в табл. 9.8 приведены результаты определения годовой потребности в запасных частях для пополнения «возимого» комплекта для текущего ремонта гидравлической части одного бурового насоса типа У8-6М.

При этом интенсивность отказов деталей определена по статистическим данным (см. табл.9.7), а коэффициент использования бурового насоса принят равным $K_m = 0,4$.

Полученные достаточно высокие значения $\bar{Z}$ указывают на необходимость значительного повышения безотказности гидравлической части применяемых буровых насосов.

Таблица 9.8

Среднее количество запасных частей для текущих ремонтов
бурового насоса У8-6М

Детали	Интенсивность отказов $n, \lambda, 1/ч$	Среднее количество потребных запасных частей $\bar{Z}$	Состав «возимого» комплекта запасных частей
Поршень	0,01025	36	1
Цилиндровая втулка	0,00394	14	1
Шток	0,00624	22	1
Клапан	0,01379	49	2

9.7. Концентрация и специализация технического обслуживания оборудования

Непрерывное расширение номенклатуры и увеличение парка нефтегазопромыслового оборудования, усложнение его конструкций, возрастание масштабов и видов технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) делают необходимым применять такие организационные формы обслуживания, которые позволили бы повысить коэффициент использования парка технологического оборудования, производительность труда обслуживающего персонала.

В современных условиях, наибольшая эффективность эксплуатации нефтегазопромысловых машин и оборудования, повышение качества и ускорение технического обслуживания и ремонта, могут быть достигнуты на основе сервисного ТО и Р путем создания специализированных централизованных производств с развитой системой внутриотраслевого и межотраслевого кооперирования и материально-технического снабжения.

Исходя из этого, должна проводиться целенаправленная работа по совершенствованию производства и управления технического и ремонтного обслуживания оборудования предприятий, осуществляющих добычу нефти и газа.

В ремонтном производстве, также как и в любом виде производственной деятельности, наибольшая эффективность, как правило, достигается при увеличении серийности (концентрация) в соче-

тании с одновременным ограничением функций и объектов труда (специализация). Только в этих условия обеспечивается возможность выработать и освоить наиболее рациональные приемы выполнения трудоемких операций, внедрить прогрессивные виды оснастки, инструмента, средств механизации.

Как было выше отмечено, время, затрачиваемое на техническое обслуживание (ТО) и текущие ремонты (ТР) объектов, является случайной величиной. Случайным является также число объектов, требующих ТО и ТР в заданный момент времени.

В специальной литературе рассмотрено множество разнообразных задач, относящихся к обслуживанию технических систем [25]. Большинство из них связаны с применением теории массового обслуживания, что позволяет в данном случае оказывать влияние на среднее время ТО и ТР объектов за счет построения обоснованной структуры системы обслуживания.

Общая структура системы обслуживания заключается в следующем.

Отказы или неисправности объектов после их обнаружения поступают в систему обслуживания (входящий поток требований), где после ТО и ТР покидают систему обслуживания (выходящий поток). Промежутки времени, через которые поступают на обслуживание объекты, и время, затрачиваемое на их обслуживание, носят случайный характер.

Так как поток входящих требований формируется случайным образом, то наиболее справедливым является предположение о простейшем (пуассоновском) потоке.

Как было выше отмечено (см. раздел 3.1), простейший поток обладает свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последствия. Ординарность потока в рассматриваемом случае заключается в том, что вероятность поступления на обслуживание за элементарно малый промежуток времени двух или нескольких объектов ничтожно мала по отношению к поступлению одного требования. Стационарность потока означает, что вероятность поступления на обслуживание того или иного количества объектов за определенный интервал времени зависит только от длительности этого интервала и не зависит от начала отсчета времени. Отсутствие последствия в потоке выражается в том, что для любых промежутков времени количество поступающих на обслуживание объектов не зависит от количества объектов, поступающих в другие временные промежутки.

При простейшем потоке, распределенном по закону Пуассона, вероятность того, что за время τ в систему поступит m требований, будет равна

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (9.71)$$

где λ - плотность потока (среднее число требований, приходящихся на единицу времени);

$\lambda\tau$ - параметр потока.

Из формулы (9.71) также следует, что вероятность того, что в систему за время τ не поступит ни одного требования

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda\tau}. \quad (9.72)$$

Если известна средняя продолжительность обслуживания одного объекта $\tau_{\text{обс}}$, то параметр μ , характеризующий интенсивность обслуживания

$$\mu = 1/\tau_{\text{обс}} \quad (9.73)$$

Вероятность того, что время на обслуживание объекта $\tau_{\text{обс}}$ будет меньше, чем наперед заданное время τ , будет равна

$$P\{\tau_{\text{обс}} \leq \tau\} = 1 - \exp(-\mu\tau). \quad (9.74)$$

Важным является установление необходимой производственной мощности специализированного предприятия, предотвращающее чрезмерное накопление объектов на постах обслуживания и ограничивающее время ожидания начала их обслуживания.

Известно, что производственная программа любого специализированного предприятия по ТО и ТР технических объектов, может определяться, исходя из ожидаемой интенсивности поступления объектов на обслуживание. Однако, во избежание накапливания объектов и увеличения сроков ожидания их ТО, производственная мощность обслуживающих постов предприятия по сервисному обслуживанию, должна быть несколько большей, чем производственная программа. Поэтому для производственных предприятий, осуществляющих обслуживание технических объектов, более эффективным является предварительное обоснование и выбор не только числа постов обслуживания, но и определение годовой программы с технико-экономических позиций: исходя из установленной производственной мощности, сменности и др.

Обслуживающие посты предприятия могут быть отнесены к системам с ожиданием, так как поступающие требования, даже при занятости постов, не покидают в конечном счете систему не обслу-

женными. Подобный случай относится к системам с ограниченным числом постов обслуживания [25]. Их можно также считать неупорядоченными системами, так как объекты могут поступать на любой свободный в данный момент пост обслуживания.

Принятое допущение о пуассоновском характере потока поступлений на посты обслуживания объектов приводит к определенным изменениям состояния системы. Рассмотрим возможные состояния системы при наличии n постов обслуживания.

x_0 - ни один пост не занят (очереди нет);

x_1 - занят только один пост (очереди нет);

x_k - занято ровно k постов (очереди нет);

x_n - заняты все n постов (очереди нет);

x_{n+1} - заняты все n постов, одна заявка на обслуживание стоит в очереди;

x_{n+s} - заняты все n постов, s заявок стоят в очереди.

Производственную мощность специализированной системы по обслуживанию можно определить, исходя из ожидаемого среднего числа требований в единицу времени. Однако, как было отмечено, для исключения накапливания на постах объектов и увеличения сроков ожидания их обслуживания, суммарная производственная мощность постов должна быть несколько большей, чем производственная программа участка.

Необходимый и достаточный процент такого превышения можно определить методами теории массового обслуживания. Исходя из этого, в дальнейшем производственный процесс ТО и ТР объекта представляется как процесс обслуживания, а производственный участок - как система или совокупность постов обслуживания.

При решении данной задачи, кроме характеристик потоков важными являются характеристики системы. К ним относятся: число постов обслуживания, число обслуживающих каждый пост специалистов-ремонтников, а также время обслуживания поступающих в систему требований.

В производственных условиях перерывы в технологическом процессе обслуживания и простои оборудования постов неизбежны. Поэтому неограниченного увеличения очереди обслуживаемых тре-

бований и накапливания на участке объектов можно избежать только при соблюдении неравенства

$$a = \lambda/v < n, \quad (9.75)$$

где λ - среднесуточный поток требований на обслуживание;

v - количество обслуженных объектов в единицу времени на каждом посту; $v = 1/m_{\text{обс}}$;

m - число постов для параллельного проведения обслуживания;

$m_{\text{обс}} = M[\tau_{\text{обс}}]$ - среднее время обслуживания одного требования.

В работе [25] величина a называется приведенной плотностью потока заявок на обслуживание, т.е. в данном случае это среднее число требований на ТО и ТР, приходящееся на среднее время выполнения одного обслуживания.

Систему массового обслуживания называют системой с ожиданием, если заявка, заставшая все каналы занятыми, становится в очередь, пока не освободится какой-нибудь канал. Если время ожидания заявки в очереди ничем не ограничено, то систему называют «чистой системой с ожиданием». Если оно ограничено какими-то условиями, то систему называют «системой смешанного типа».

Для рассматриваемого случая наибольший интерес представляет чистая система с ожиданием, так как в такой системе заявки не уходят из очереди, и поэтому вероятность того, что заявка покинет систему не обслуженной, равна нулю. Другими словами: каждая заявка рано или поздно дождется обслуживания. Однако, в чистой системе с ожиданием не всегда имеется предельный стационарный режим при $\tau \rightarrow \infty$. Доказано [26], что такой режим существует только при $a < n$, т.е. когда среднее число заявок, приходящееся на время обслуживания одной заявки, не выходит за пределы возможностей n -канальной системы. Если же $a \geq n$, то число заявок, стоящих в очереди, будет с течением времени неограниченно возрастать.

Исходя из предположения, что $a < n$, получено выражение предельной вероятности $P_k (0 \leq k \leq n)$ для чистой системы с ожиданием [25]. Вероятность того, что заняты и обслуживают все поступившие требования k обслуживающих постов, равна:

$$P_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=1}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}, \quad (0 \leq k \leq n). \quad (9.76)$$

В частном случае, когда все посты обслуживания свободны:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}. \quad (9.77)$$

Вероятность наличия очереди не обслуженных требований:

$$P_{оч} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_n). \quad (9.78)$$

Средняя длина очереди не обслуженных требований:

$$M = \frac{\frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n! \left(1 - \frac{\alpha}{n}\right)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}. \quad (9.79)$$

Среднее время ожидания начала обслуживания:

$$T_{ож} = \frac{P_{оч}}{n \cdot \nu - \lambda}. \quad (9.80)$$

Таким образом, наиболее важным является оценка средних величин длины очереди M и времени ожидания начала обслуживания объектов $T_{ож}$.

Рассмотрим данную задачу с учетом возможного превышения производственной мощностью предприятия потока поступающих на обслуживание объектов на примере ТО и ТР грузового автомобильного транспорта. К нему могут быть отнесены не только автомашины, используемые для перевозки грузов, но и значительная номенклатура установок на шасси автомашин, применяемые для подземного ремонта нефтяных и газовых скважин и выполнения вспомогательных работ на промыслах.

Методика решения поставленной задачи основывается на последовательной оценке величин M и $T_{ож}$ в зависимости от превышения производственной мощностью потока требований на обслуживание. Наряду с зависимостями (9.75)-(9.80), воспользуемся также методическими положениями, приведенными в работах [25, 26].

Примем годовую производственную программу специализированного предприятия равной 500 ед. при числе постов обслу-

живания $n = 2$. Среднесуточное поступление автомашин на техническое обслуживание при такой программе или поток требований при работе предприятия в одну смену $\lambda = 2$.

На первом этапе исследований, требуется определить: при каком превышении производственной мощностью постов обслуживания N_1 потока требований λ (или при каком соответствующем значении α) очередь на обслуживание M и сроки начала его обслуживания ($T_{ож}$) не достигнут установленного значения (например, $M = 10$ ед.: $T_{ож} = 5$ сут.).

На втором этапе устанавливается степень влияния превышения производственной мощностью постов обслуживания N_1 потока поступающих требований λ на величину очереди на обслуживание и сроки его ожидания в зависимости от возрастания величины $r = \frac{N_1 - \lambda}{\lambda}$ (в %); здесь N_1 - сменная производственная мощность; λ - плотность потока поступающих требований.

В табл. 9.9 и 9.10 приведены результаты расчетов длины очереди и времени ожидания обслуживания, при последовательном увеличении производственной мощности рассматриваемого предприятия по сравнению с его программой $\left(\frac{N_1 - \lambda}{\lambda}\right)$ на: 1; 2; 3; 6; 8; 9; 10; 15 и 20%.

Таблица 9.9

Результаты оценки средней длины очереди на обслуживание

Расчетная производственная мощность предприятия, шт.			Значения соотношений		Средняя длина очереди ожидающих ТО объектов M , шт.
годовая N	сменная λ	одного поста v	$\alpha = \lambda/v$	$r = \frac{N_1 - \lambda}{\lambda}, \%$	
505	2,02	1,01	1,98	1	98
510	2,04	1,02	1,96	2	48
515	2,06	1,03	1,94	3	31
530	2,12	1,06	1,89	6	16
540	2,16	1,08	1,85	8	11
545	2,18	1,09	1,83	9	10
550	2,20	1,10	1,82	10	9
575	2,30	1,15	1,74	15	6
600	2,40	1,20	1,67	20	4

Таблица. 9.10

Результаты оценки среднего времени ожидания начала обслуживания

r	Вероятность				Среднее время ожидания объектами ТО $T_{ож}, \text{сут.}$
	незанятости постов P_0	занятости одного поста P_1	занятости двух постов P_2	наличия очереди $P_{оч}$	
1	0,0050	0,0099	0,0098	0,9753	49
2	0,0101	0,0198	0,0194	0,9507	24
3	0,0152	0,0295	0,0287	0,9266	16
6	0,0283	0,0534	0,0505	0,8678	8
8	0,0390	0,0721	0,0667	0,8222	6
9	0,0444	0,0812	0,0743	0,8001	5
10	0,0471	0,0858	0,0780	0,7891	4
15	0,0695	0,1210	0,1052	0,7043	3
20	0,0899	0,1502	0,1254	0,6345	2

Как видно из табл. 9.9 и 9.10, ограничение очереди ожидающих ТО автомашин до 10 ед. и времени ожидания ими начала обслуживания до 5 сут. вполне обеспечивается при увеличении производственной мощности предприятия по отношению к его программе на 10%.

Приведенные в табл. 9.9 результаты расчета средней длины очереди M ожидающих ТО объектов приведены на рис.9.7 в виде графика. При этом показано (заштрихованный участок), что безграничное превышение производственной мощностью потока требований на ТО нецелесообразно. На рис.9.7 указано ограничение изменения соотношения r с 3 до 10%, что соответствует уменьшению очереди на обслуживание автомашин с 31 до 9 ед. При дальнейшем увеличении r длина очереди M , а следовательно, и время ожидания начала обслуживания $T_{ож}$, еще больше сокращаются. А с увеличением соотношения r свыше 8% интенсивность уменьшения величины M значительно падает, что также наглядно видно из рис.9.7.

Следует, однако, учесть, что время ожидания объектами начала обслуживания $T_{ож}$ зависит не только от соотношения r , но и от производственной программы предприятия, так как с ее увеличе-

нием уменьшаются средние сроки ожидания объектами начала процесса [25].

Таким образом, при определении производственной программы специализированного предприятия по техническому обслуживанию изделий машиностроения необходимо, во избежание излишнего накапливания очереди объектов на ТО и чрезмерного увеличения сроков ожидания начала их обслуживания, производственную мощность технологических постов принимать несколько большей, чем производственная программа. Методы теории массового обслуживания позволяют решать подобные задачи.

Зависимость средней длины очереди ожидающих обслуживания

объектов от значения соотношения $r = \frac{N_1 - \lambda}{\lambda}$

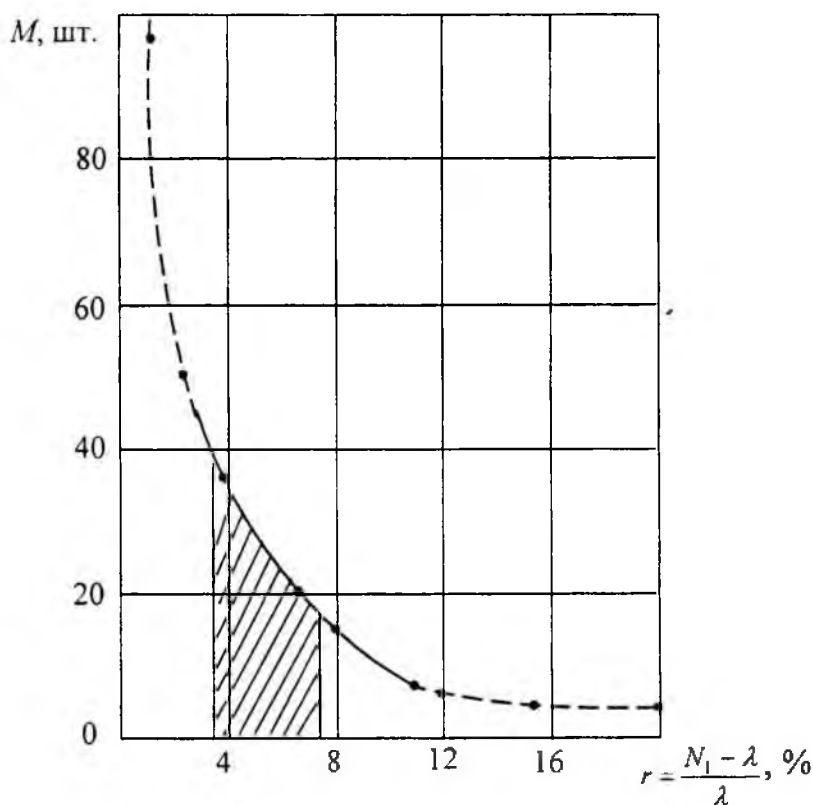


Рис. 9.7.

10. Определительные, контрольные и ускоренные испытания на надежность

Применяемые виды испытаний на надежность: определительные, контрольные и ускоренные испытания, различаются по постановке задачи и методам проведения. Основной целью контрольных испытаний [35] является выяснение вопроса о том, соответствуют ли показатели надежности партии образцов изделия требованиям стандартов, технических условий (ТУ) или техническому заданию на их проектирование (ТЗ), а также выявление причин отказов и разработка рекомендаций по повышению надежности.

Определительные испытания проводятся [9] для установления фактических значений показателей надежности вновь разрабатываемых и модернизируемых изделий, или же приобретаемой партии изделий. Результаты определительных испытаний служат основанием для внесения показателей надежности в техническую документацию изделия.

Испытания на надежность проводятся по различным планам, устанавливающим объем выборки, порядок их проведения, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний.

Контрольные и определительные испытания проводятся на: безотказность, ремонтпригодность, монтажепригодность, сохраняемость и долговечность (ресурсные испытания).

Для нефтепромыслового оборудования наиболее важным являются испытания на безотказность и ремонтпригодность. Выбор количественных показателей зависит от назначения и конструкции изделия, условий его эксплуатации, степени ответственности изделия, определяемой последствиями отказов.

Широкое применение получили такие показатели как «средняя наработка до отказа», «средняя наработка на отказ», «среднее время восстановления», которые равны математическим ожиданиям соответствующих случайных величин. Для невозстанавливаемых изделий при оценке безотказности часто применяются показатели: «вероятность безотказной работы» и «интенсивность отказов», а для восстанавливаемых изделий, наряду с показателями «вероятность восстановления», «интенсивность восстановления», «средняя трудоемкость восстановления», используют показатели: «удельная трудоемкость ремонта» и «удельная трудоемкость технического обслуживания».

Наряду с законом распределения случайной величины исходными данными для планирования определительных испытаний на надежность являются:

- ожидаемое значение показателя надежности;
- односторонняя доверительная вероятность γ ;
- относительная доверительная ошибка δ .

Значение односторонней доверительной вероятности γ при планировании испытаний рекомендуется [36] на стадии передачи разработки в серийное производство принимать равным $\gamma=0,8...0,95$.

Если по результатам испытаний относительная доверительная ошибка δ окажется равной или меньше заданной, то требования к точности оценки выполняются. Исходя из допущения, что у качественно изготовленного изделия закон распределения наработки до первого отказа от партии к партии не меняется, при планировании контрольных испытаний можно использовать метод контроля по количественным признакам. При этом из контролируемой партии отбирается в случайном порядке N изделий, проводится их испытание и оценивается требуемый показатель (например, наработка до отказа) для каждого изделия (T_i). Пусть он оказался $T_1, T_2, \dots, T_N$. Качество партии изделий считается удовлетворительным, если $T_N = (T_1, T_2, \dots, T_n) \in D_1$, и неудовлетворительным, если $T_N \in D_2 = R_N / D_2$ (где R_N - пространство наблюдений). Величина выборки N и характер разбивки (D_1, D_2) пространства наблюдений R_N зависят от функции распределения $F(t)$, а также от требований к точности испытаний. Эти требования сводятся к тому, чтобы оперативная характеристика - вероятность $L(q_2)$ принятия партии с браковочным уровнем качества не превосходила β , а вероятность $1 - L(q_1)$ забракования партии с приемлемым уровнем качества q_1 не превосходила α . Величину α называют риском изготовителя, а β - риском потребителя, значения которых выбираются из ряда 0,05; 0,1; 0,2 по согласованию между потребителем и изготовителем.

Испытания на надежность могут также проводиться методами ускоренных испытаний, если определены: режимы ускоренных испытаний и коэффициенты ускорения или зависимости между показателями надежности в нормальном и ускоренном режимах.

10.1. Определительные испытания на надежность

Метод проведения определительных испытаний на надежность выбирается в зависимости от вида оцениваемого показателя надежности и закона распределения случайной величины.

Определение вероятности безотказной работы за заданное время и вероятности восстановления за заданное время проводится при любом законе распределения одноступенчатым методом с ограниченной продолжительностью испытаний [36].

Определение средней наработки до отказа, средней наработки на отказ, среднего ресурса, среднего срока сохраняемости проводится:

- в случае экспоненциального распределения - одноступенчатым методом с ограниченным числом отказов;
- в случае нормального распределения - одноступенчатым методом до отказа всех испытываемых образцов.

Наряду с предполагаемым законом распределения случайной величины, исходными данными для планирования определительных испытаний на надежность являются:

- ожидаемое значение показателя надежности;
- односторонняя доверительная вероятность γ^* ;
- относительная доверительная ошибка δ (или значение верхней R_v или нижней R_n доверительных границ). Если задана доверительная граница, то δ определяется:

$$\delta = \frac{\ln R_n(t_n) - \ln R_{ож}(t_n)}{\ln R_{ож}(t_n)}; \quad (10.1)$$

- для показателя, представляющего собой математическое ожидание

$$\delta = \frac{R_v - R_{ож}}{R_{ож}}. \quad (10.2)$$

Значение односторонней доверительной вероятности γ^* при планировании испытаний принимают равным 0,8.

Значение δ рекомендуется выбирать для: показателей надежности, представляющих собой вероятность возникновения событий в фиксированном интервале времени, в пределах от 0,4 до 0,8; показателей надежности, представляющих собой математическое ожидание случайной величины или квантиль распределения в пределах от 0,3 до 0,45.

Если, по результатам испытаний относительная доверительная ошибка δ равна или меньше заданной, то требования к точности оценки выполняются. Если больше заданной, то требования к точности оценки не выполняются.

10.1.1. Определительные испытания на безотказность

Определительные испытания на безотказность сводятся к оценке вероятности безотказной работы за заданное время или средней наработки до отказа, или средней наработки на отказ. Подобные испытания рекомендуется проводить одним из следующих методов:

- одноступенчатым с ограниченной продолжительностью испытаний (план NUT);
- одноступенчатым с ограниченным числом отказов (план NUr);
- одноступенчатым с доведением всех испытываемых образцов до отказа (план NUN).

При определительных испытаниях на безотказность, режим испытаний выбирается исходя из данных, полученных в результате граничных испытаний, и должен удовлетворять условию $x_1, x_2, \dots, x_k \in X$, т.е. элемент режима испытаний должен принадлежать множеству допустимых режимов X .

Формулы для получения значений количественных показателей для различных законов распределения [36]. Если распределение наработок до отказа подчиняется нормальному закону, то при использовании принятых планов

$$[\text{NUT}]: \quad \hat{T} = k\sigma_\tau + T_3; \quad \hat{\sigma}_\tau = \frac{T_3 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^d t_i}{\frac{N-d}{d} f_1(k) - k}; \quad (10.3)$$

$$[\text{NUr}]: \quad \hat{T} = k\sigma_\tau + \hat{T}_r; \quad \hat{\sigma}_\tau = \frac{\hat{T}_r - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i}{\frac{N-r}{r} f_1(k) - k}, \quad (10.4)$$

где $\hat{T}_r$ - среднее время до отказа r изделий;

r - число отказавших изделий;

d - число изделий, у которых наработка до отказа $t_i > T_3$;

T_3 - время, за которое вычисляется $P(t)$;

σ_τ - среднеквадратическое отклонение с точечной оценкой $\hat{\sigma}_\tau$;

t_i - значение наработки до отказа в каждом конкретном случае;

K - коэффициент:

для плана [NUT]
$$K = \frac{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d t_i^2 - \left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d t_i \right)^2}{\left(T_3 - \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d t_i \right)^2}; \quad (10.5)$$

для плана [NUr]
$$K = \frac{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^r \ln^2 t_i - \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i \right)^2}{\left(\ln t_i - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i \right)^2}. \quad (10.6)$$

В работе [36], для случая испытаний одноступенчатым методом при плане [NUr], приведены табулированные значения коэффициента k , соответствующие минимальному количеству испытаний.

Если наработка до отказа объектов распределена по экспоненциальному закону, то интенсивность отказов при принятых планах:

[NUT]:
$$\hat{\lambda} = \frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i + (N-d)\bar{T}_1}, \quad 0 \leq d \leq N; \quad (10.7)$$

[NUr]:
$$\hat{\lambda} = \frac{r-1}{\sum_{i=1}^r t_i + (N-r)\bar{T}_r}, \quad \text{при } r > 1. \quad (10.8)$$

Как было отмечено, для оценки средней наработки до отказа изделий при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы рекомендуется применять одноступенчатый метод с ограниченным числом отказов. При этом методе испытания планируются следующим образом:

- выбирается ожидаемое значение средней наработки до отказа $\bar{T}_1$;
- определяется минимальное количество испытаний m , заканчивающихся отказом;
- принимается доверительная вероятность γ ;

- определяется, при необходимости, ориентировочное значение ожидаемой суммарной наработки $T_{\Sigma} = mt_{\text{ож}}$.

По полученным статистическим данным испытаний определяются:

- точечная оценка средней наработки до отказа

$$\bar{T}_1 = \frac{T_{\Sigma \text{оп}}}{r_{\text{оп}}}; \quad T_{\Sigma \text{оп}} = \sum_{i=1}^N t_i; \quad r_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^n r_i;$$

- верхняя и нижняя границы средней наработки до отказа в зависимости от значения доверительной вероятности γ , а также минимального количества испытаний m . Значения доверительных границ $P(t)$ табулированы [36].

Наиболее характерен для определительных испытаний случай, когда объем выборки значительно меньше генеральной совокупности. В этом случае для оценки нижней P_n и верхней P_v границ вероятности безотказной работы используют биномиальное распределение (см. формулу (3.10)). При испытаниях N изделий доверительную вероятность $(1 - \gamma)$ выхода на каждую из границ принимают равной вероятности появления в одном случае не более r отказов, в другом - не менее r отказов.

$$\sum_{i=1}^r \frac{N!}{i!(N-i)!} (1 - P_n)^i P_n^{N-i} = 1 - \gamma; \quad (10.9)$$

$$\sum_{i=r}^n \frac{N!}{i!(N-i)!} (1 - P_v)^i P_v^{N-i} = 1 - \gamma. \quad (10.10)$$

Относительную доверительную ошибку вычисляют по формуле:

$$\delta_{\text{оп}} = \frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_n}{\bar{T}_1}. \quad (10.11)$$

10.1.2. Определительные испытания на ремонтпригодность

Определительные испытания на ремонтпригодность сводятся к оценке среднего времени восстановления $\bar{\tau}_v$, средней оперативной продолжительности технического обслуживания (текущего ремонта) $\bar{\tau}_{\text{то}}$, вероятности восстановления работоспособности за заданное время $P(\tau_v)$. Исходными данными для планирования определительных испытаний для оценки $\bar{\tau}_v$ или $\bar{\tau}_{\text{то}}$ являются:

- число испытаний, законченных восстановлением - d_b ;
- ожидаемое значение среднего времени восстановления - $\bar{\tau}_{\text{ож}}$;
- относительная доверительная ошибка - δ_b ;
- односторонняя доверительная вероятность - γ^* ;
- ожидаемое значение коэффициента вариации $V_{\text{ож}}$ (для нормального закона распределения).

Минимальное число испытаний m_b для оценки $\bar{\tau}_b$ определяется в зависимости от заданных значений γ^* и δ_b . Табулированные значения m_b для нормального и экспоненциального закона распределений приведены в работе [36].

Точечную оценку среднего времени восстановления определяют при любом законе распределения по формуле:

$$\bar{\tau}_b = \frac{1}{d_b} \sum_{i=1}^{d_b} \tau_i.$$

Нижнюю $\tau_{\text{нн}}$ и верхнюю $\tau_{\text{вв}}$ доверительные границы определяют

$$\tau_{\text{нн}} = \bar{\tau}_b + k\sigma_b; \quad (10.12)$$

$$\tau_{\text{вв}} = \bar{\tau}_b - k\sigma_b, \quad (10.13)$$

где σ_b - оценка среднеквадратического отклонения;

k - коэффициент, определяемый в зависимости от d_b ; значения k табулированы [36].

При экспоненциальном распределении доверительные границы определяются

$$\tau_{\text{нн}} = k_{\text{н}} \cdot \bar{\tau}_b; \quad \tau_{\text{вв}} = k_{\text{в}} \cdot \bar{\tau}_b.$$

Относительную доверительную ошибку при любом законе распределения определяют по формуле:

$$\delta_b = \frac{\tau_{\text{вв}} - \tau_{\text{нн}}}{\bar{\tau}_b}. \quad (10.14)$$

10.1.3. Примеры планирования определительных испытаний на безотказность

Пример 1. В техническом задании на разработку нефтепромыслового насоса высокого давления указано:

- ожидаемое значение вероятности безотказной работы $P_{\text{ож}}(200) = 0,90$;

- относительная доверительная ошибка $\delta = 0,6$;
- односторонняя доверительная вероятность $\gamma^* = 0,8$.

Требуется провести определительные испытания на безотказность для оценки вероятности безотказной работы $P(t)$ за заданное время t .

Для проведения испытаний принимаем одноступенчатый метод с ограниченной продолжительностью (план NUT).

Максимальную продолжительность одного опыта выбираем $t_n = 200$ ч.

По табулированным в зависимости от $P_{ож}$, γ^* , δ значениям [36], определяем минимальное число испытаний $m = 50$.

На испытания поставлено 6 насосов, на которых проводятся 50 исследований продолжительностью 200 ч. В результате испытаний отмечено $\alpha = 10$ отказов.

Определяем точечную оценку вероятности безотказной работы

$$P(t_n) = 1 - \frac{10}{50} = 0,80.$$

Определяем нижнюю $P_n(t)$ и верхнюю $P_b(t)$ доверительные границы по табулированным в зависимости от m , d и γ^* значениям [36]:

$$P_n = 0,737; \quad P_b = 0,855.$$

Определяем относительную доверительную ошибку

$$\delta_{оп} = \frac{\ln P_n(t_n) - \ln P(t_n)}{\ln P(t_n)} = \frac{\ln 0,737 - \ln 0,80}{\ln 0,80} = 0,36.$$

Так как по результатам испытаний относительная доверительная ошибка δ оказалась меньше заданной, то требование к точности оценки выполнено.

Пример 2. В техническом задании на разработку фрикционной муфты основной лебедки подъемной установки типа АЗИНМАШ-37А указано:

- ожидаемое значение средней наработки на отказ $\bar{T}_{ож} = 700$ ч;
- относительная доверительная ошибка $\delta = 0,3$;
- односторонняя доверительная вероятность $\gamma^* = 0,8$;
- ожидаемое значение коэффициента вариации $V_{в\,ож} = 0,60$;
- предполагаемый закон распределения - нормальный.

Требуется провести определительные испытания на безотказность для оценки средней наработки на отказ.

Для проведения испытаний выбираем одноступенчатый метод с доведением всех испытываемых образцов до отказа (план NUN).

По табулированным значениям [36], в зависимости от γ^* , δ , $V_{ож}$ определяем минимальное число испытаний $m=8$. На испытания поставлены 3 подъемные установки, которые испытывались до отказов $d_{оп} = m=8$, (т.е. 3 установки после отказа восстанавливались и вновь включались на испытания). В момент возникновения восьмого отказа испытания прекратились.

По результатам статистической обработки полученной информации об отказах фрикционной муфты основной лебедки подъемной установки типа АЗИНМАШ-37А [6, 21] определяем точечную оценку средней наработки на отказ

$$\bar{T} = \frac{1}{d_{оп}} \sum_{i=1}^{d_{оп}} t_i = \frac{1}{8} \cdot 5864 = 733 \text{ ч},$$

а также среднее квадратическое отклонение $\sigma^* = 323 \text{ ч}$ и коэффициент вариации $V^* = 0,44$.

Верхнюю и нижнюю границу средней наработки на отказ определяем по формулам:

$$T_{\bar{}} = \bar{T} + k\sigma = 733 + 0,317 \cdot 323 = 835,4 \text{ ч};$$

$$T_{\underline{}} = \bar{T} - k\sigma = 733 - 0,317 \cdot 323 = 630,6 \text{ ч},$$

где k - коэффициент, определяемый в зависимости от $d_{оп}$ по табулированным значениям [36]; $k = 0,317$.

Относительную доверительную ошибку вычисляем по формуле:

$$\delta_{оп} = \frac{\bar{T} - T_{\underline{}}}{\bar{T}} = \frac{733 - 630,6}{733} = 0,14,$$

т.е. требование к точности оценки δ выполнены.

10.2. Контрольные испытания на надежность

Контрольные испытания на надежность проводят для оценки соответствия показателей надежности изделий требованиям стандартов, ТУ и ТЗ. Рекомендуется [36] контрольные испытания на

безотказность проводить последовательным или одноступенчатым методом с ограниченной продолжительностью испытаний. Исходными данными для составления плана контрольных испытаний на безотказность являются: приемочный и браковочный уровни показателя безотказности за время t ; риск изготовителя α и риск потребителя β ; количество опытов (испытываемых изделий) N и приемочное число отказов r ; принятый при планировании испытаний закон распределения контролируемого показателя надежности.

10.2.1. Контрольные испытания на безотказность

Планирование испытаний на безотказность проводится следующим образом [36]:

- определяется величина отношения приемочного и браковочного значений средней наработки до отказа - T_α/T_β . Браковочный уровень T_β , как правило, принимается равным значению T_n , заданному в ТУ, приемочное значение T_α рекомендуется принимать в 1,5...15 раз превышающим T_β ; для заданных значений α и β определяется план контроля по табулированным данным (в работе [36]).

Одноступенчатые испытания проводятся с применением плана [NUT], а испытания последовательным методом - по плану [NUr]. График последовательных испытаний (в предположении справедливости экспоненциального распределения) строится по параметрам плана испытаний в координатах T_Σ/T_α ; r по уравнениям

$$r = a \frac{T_\Sigma}{T_\alpha} + r_0; \quad r = a \left(\frac{T_\Sigma}{T_\alpha} - \frac{T_0}{T_\alpha} \right),$$

где

$$a = \frac{\frac{T_\alpha}{T_\beta} - 1}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}; \quad r_0 = \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{T_\alpha}{T_\beta}}; \quad \frac{T_0}{T_\alpha} = \frac{\ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\frac{T_\alpha}{T_\beta} - 1}.$$

Если испытания объекта проводятся без восстановления, то минимальный объем выборки принимается равным установленному числу отказавших изделий, т.е. $N_{\min} = r_{yc}$. При этом суммарную наработку, по результатам испытаний по плану [NUr], определяют по формуле

$$T_{\Sigma} = (N - r)t + \sum_{j=1}^r t_j. \quad (10.15)$$

Результаты испытаний считаются положительными, если после очередного отказа точка на графике попадает в область, ниже линии соответствия (рис. 10.1) и отрицательными, - если в область выше несоответствия. Если точка на графике попадает между линиями соответствия и несоответствия, то испытания продолжаются.

График последовательных испытаний



1 - линия соответствия; 2 - линия несоответствия.

Рис. 10.1.

Подробно необходимые расчеты и порядок построения графика последовательных испытаний приведены в методических указаниях [14].

10.2.2. Контрольные испытания на ремонтпригодность

Контроль среднего времени восстановления $\bar{\tau}_в$ и средней оперативной продолжительности технического обслуживания $\bar{\tau}_{то}$ в случае экспоненциального распределения проводят следующим

образом. Выбирают из стандартов, ТУ или ТЗ приемочное $\bar{\tau}_{в\alpha}$ и браковочное $\bar{\tau}_{в\beta}$ значения среднего времени восстановления или приемочное $\bar{\tau}_{то\alpha}$ и браковочное $\bar{\tau}_{то\beta}$ значения средней оперативной продолжительности технического обслуживания.

Далее выбирают значения рисков изготовителя α и потребителя β . Объем выборки (количество отказов) m_b и приемочный норматив $a/\bar{\tau}_{в\alpha}$ вычисляют исходя из табулированного соотношения $\bar{\tau}_{в\beta}/\bar{\tau}_{в\alpha}$ [36].

Испытания и оценка их результатов проводятся следующим образом. Испытания объектов производят до наступления m_b отказов. Объекты восстанавливают и по окончании испытаний подсчитывают значение $\tau_{\Sigma}/\bar{\tau}_{в\alpha} \cdot m_b$. Если $\tau_{\Sigma}/\bar{\tau}_{в\alpha} \cdot m_b \leq a/\bar{\tau}_{в\alpha}$, то результаты испытаний считают положительными. Если $\tau_{\Sigma}/\bar{\tau}_{в\alpha} \cdot m_b > a/\bar{\tau}_{в\alpha}$, то результаты испытаний считают отрицательными.

10.2.3. Пример планирования контрольных испытаний на ремонтпригодность

В технических условиях (ТУ) на объекты указано:

- приемочное значение среднего времени восстановления $\bar{\tau}_{в\alpha}=4,5$ ч;
- браковочное значение среднего времени восстановления $\bar{\tau}_{в\beta}=11,3$ ч;
- риск изготовителя $\alpha = 0,1$;
- риск потребителя $\beta = 0,1$;

Закон распределения среднего времени восстановления - экспоненциальный.

Испытания объектов планируются следующим образом. В соответствии с исходными данными определяем объем выборки m_b и приемочный норматив $a/\bar{\tau}_{в\alpha}$ по табулированным значениям, приведенным в работе [36]: $m_b = 6$; $a/\bar{\tau}_{в\alpha}=0,525$.

По результатам шести испытаний по восстановлению работоспособности объектов, получаем:

$$\tau_{в\Sigma} = 9 \text{ ч. } (\tau_{в1} = 1; \tau_{в2} = 1,6; \tau_{в3} = 1,8; \tau_{в4} = 1,2; \tau_{в5} = 1; \tau_{в6} = 1,4).$$

Находим отношение

$$\frac{\tau_{в\Sigma}}{\bar{\tau}_{в\alpha} \cdot m_b} = \frac{9}{4,5 \cdot 6} = 0,333.$$

Полученную величину сравниваем с приемочным нормативом.

Поскольку $a/\bar{\tau}_{в\alpha} > \tau_{в}/\bar{\tau}_{в\alpha} \cdot m$ ($0,525 > 0,333$), то результаты испытаний объектов можно считать положительными.

10.3. Ускоренные испытания оборудования на надежность

Несмотря на широкое распространение испытаний в эксплуатационном режиме, их сравнительную простоту и достаточную точность результатов, они из-за значительной длительности не всегда приемлемы.

Для своевременного получения информации, особенно при подготовке к производству новых изделий, более эффективным является проведение ускоренных испытаний оборудования на надежность [4].

Ускорения испытаний на надежность механических систем можно достичь ужесточением нагрузочного фактора, в том числе увеличением относительного времени работы изделия на тяжелых режимах, и характеристик внешней среды, экстраполяцией характеристик случайного процесса возникновения отказов, моделированием процессов износа и старения систем с помощью различных устройств.

Выбор того или иного способа ускорения испытаний на надежность в каждом конкретном случае необходимо производить как с учетом конструктивных, технологических особенностей изделия и условий его эксплуатации, так и цели испытаний (определение показателей надежности новой машины, оценка результатов конструктивных или технологических изменений, контроль показателей надежности продукции текущего производства).

Все способы ускорения испытаний на надежность можно свести к ускоренным испытаниям в нормальном и форсированном режимах.

Ускорение испытаний в нормальном режиме достигается уплотнением рабочих циклов или экстраполяцией по наработке, добиваясь сокращения перерывов в работе, исключения по возможности холостых ходов, устранения простоев, сокращения продолжительности вспомогательных работ и т. п.

Необходимое условие уплотнения рабочих циклов - исключение влияния непрерывности работы на интенсивность процессов, приводящих к отказам.

Для перевода полученных при ускоренных испытаниях данных в параметры, соответствующие нормальным условиям, нужно знать коэффициент ускорения K . Он определяется как отношение значения исследуемого параметра (например, среднего срока службы) при нормальном режиме к его значению при форсированном режиме.

Различают модели отказов, основанные на изучении закономерности изменения выходных параметров (параметрическая модель) и статистики отказов (цензурированная модель).

Для параметрической модели вероятность отказа определяется характером изменения выходных параметров вследствие деградационных процессов, приводящих к отказам. Наибольшего сокращения продолжительности испытаний достигается при использовании параметрической модели с привлечением статистической классификации, базирующейся на теории распознавания образов. Этот прием позволяет судить о надежности изделий по значениям выходных параметров, оцененных перед началом эксплуатации.

Модель, основанная на регистрации моментов отказов с ограничением продолжительности испытаний, приводит к получению выборки, представляющей наработку всех объектов испытаний как отказавших, так и оставшихся работоспособными. При этом прекращение испытаний может быть обусловлено достижением заданной наработки или заданного количества отказов.

Различают две группы методов ускорения испытаний в форсированном режиме, отличающиеся способом пересчета их результатов на нормальные условия:

- требующие предварительного определения коэффициента пересчета;
- позволяющие оценивать результаты испытаний без определения коэффициента пересчета.

К первой группе относят: усечение спектра нагрузок; повышение скорости приложения нагрузок; принцип сравнения.

Усечение спектра нагрузок заключается в исключении части нагрузок, не оказывающих заметного повреждающего действия на объект испытаний, что приводит к повышению среднего уровня нагрузок и, следовательно, более быстрому исчерпанию ресурса. Частным случаем усечения спектра нагрузок является исключение

установившейся части рабочего цикла, т.е. работа в неустановившемся режиме.

Повышение скорости приложения нагрузок осуществляется на основе увеличения частоты циклического нагружения или скорости движения под нагрузкой.

Принцип сравнения основан на использовании данных об аналогичных изделиях. В зависимости от имеющейся информации оценка надежности изделий производится следующими способами:

- сравнением показателей надежности двух видов изделий по результатам только форсированных испытаний;

- сравнением показателей надежности изделия в форсированном режиме с результатами испытаний в этом и нормальном режимах изделия - аналога;

- пересчетом результатов испытаний изделия в форсированном режиме к нормальному режиму при наличии зависимости показателей надежности от уровня нагрузки.

Ко второй группе методов ускорения испытаний относят: экстраполяцию; "доламывание"; принцип запросов.

Экстраполяцию (распространение исследуемого параметра, полученного по результатам ускоренных испытаний, на значение параметра при испытаниях в нормальном режиме), например по наработке, осуществляют на основе моделей отказов, параметры которых оценивают по результатам испытаний форсированной продолжительности.

Коэффициент ускорения испытаний при экстраполяции по наработке K_n вычисляют по формулам [4]

$M\{T_{cl}(N, N)/T_{cl\text{ ус}}\}$ -параметрическая модель;

$M\{T_{cl}(N, N)/M\{T_{cl}(r, N)\}$ -цензурированная модель,

где $T_{cl}(r, N)$ - срок службы r -го объекта в выборке объема N , упорядоченной по возрастанию наработок;

$T_{cl\text{ ус}}$ - календарная продолжительность испытаний;

M - оператор математического ожидания.

При использовании метода экстраполяции особенно важны достоверность определения параметров зависимостей, правомерность выбора их вида, оценка допустимых пределов экстраполяции и выбор интервала варьирования переменных в эксперименте. Примером экстраполяции по нагрузке может служить метод оценки предела выносливости.

При "доламывании" изделия, имеющие различную наработку в нормальном режиме, доводят до отказа в форсированном режиме. В этом же режиме определяют показатели надежности новых изделий (не имеющих наработки в нормальном режиме), по которым затем определяют показатели надежности в нормальном режиме, используя теорию накопления повреждений. Возможна и другая последовательность нагружения сначала в форсированном, затем в нормальном режимах.

Принцип запросов применяется, когда возможно измерение выходного параметра, выход которого за допустимые пределы означает отказ. В ходе испытаний нормальные и форсированные режимы нагружения чередуются.

Коэффициент ускорения испытаний подсчитывается по вышеприведенным формулам, где $T_{\text{сн}}(N, N)$ означает продолжительность форсированных испытаний.

Коэффициенты пересчета показателей надежности определяют по методу равных вероятностей.

Для элементов изделия, испытываемого в нескольких различных нормальных и форсированных режимах, коэффициент пересчета показателей надежности K_j определяется [4]

$$K_j = \sqrt{\frac{\sum_j a_j k_j}{\sum_i a_i / k_i}} = \sqrt{\frac{\sum_j \frac{a_j}{\sum_i a_i k_{ij}}}{\sum_i \frac{a_i}{\sum_j a_j k_{ji}}}}, \quad (10.16)$$

где a_i, a_j - доли наработки в i -м нормальном и j -м форсированном режимах соответственно;

$k_{ji} = \frac{1}{k_{ij}}$ - коэффициент пересчета от j -го форсированного режима к i -му нормальному;

K_i - коэффициент пересчета от комплексного форсированного режима к i -му нормальному;

K_j - коэффициент пересчета от j -го форсированного к комплексному нормальному режиму.

Из (10.16) вытекают два часто применяемых частных случая.

$$k_3 = \sum_j a_j k_j,$$

когда нормальный режим один, а форсированных несколько, и

$$k_3 = \left[\sum_j a_j / k_j \right]^{-1},$$

когда нормальных режимов несколько, а форсированный только один.

При организации испытаний на надежность нефтепромыслового оборудования возникает задача выбора наиболее рационального плана испытаний из некоторого множества планов, регламентированных стандартом.

Чтобы установить какой тип плана испытаний будет более эффективным (рациональным) по некоторому критерию (такими критериями являются, например, точность оценки показателя надежности, продолжительность испытаний и т. п.), нужно сравнить между собой функции эффективности $W(\Pi)$ с учетом ограничений $\Omega(\Pi)$.

При заданных ограничениях $\Omega(\Pi)$ и функции эффективности $W(\Pi)$ план испытаний Π_i , считается эффективней плана Π_j , если $W(\Pi_i) > W(\Pi_j)$ при $W(\Pi) \rightarrow \max$ или $W(\Pi_i) < W(\Pi_j)$ при $W(\Pi) \rightarrow \min$. Если $W(\Pi_i) = W(\Pi_j)$, то планы испытаний Π_i и Π_j эквивалентны по критерию $W(\Pi)$.

Сравним наиболее часто употребляемые планы испытаний на надежность невозстанавливаемого нефтепромыслового оборудования [NUr] и [NUz] по критериям продолжительности испытаний и стоимости, полагая, что наработки до отказа t изделий подчиняются экспоненциальному распределению с параметром λ $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$.

При плане испытаний [NUr], как было выше отмечено, одновременно испытывают N объектов, отказывающие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют; испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигнет r . При плане же [NUz] каждый объект испытывают в течение наработки z_i (где $i = 1, 2, \dots, N$).

Для плана [NUr] продолжительность испытаний T_1 равна [9]:

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{N + 0,5}{N - r + 0,5} \right), \quad (10.17)$$

где N - объем выборки; r - число отказов.

Для плана [NUz] продолжительность испытаний вычислим из следующих соображений.

Пусть наработка работоспособных изделий τ (наработка до цензурирования) подчиняется также экспоненциальному распределению с параметром μ :

$$F(\tau) = 1 - e^{-\mu\tau}.$$

В этом случае величина $z = \min(t, \tau)$, подчиняется также экспоненциальному распределению с параметром Λ :

$$\Lambda = \lambda + \mu.$$

Таким образом, план испытаний [NUz] можно трактовать, как план [NUN], если не различать наработки до отказа и наработку работоспособных изделий. Продолжительность испытаний по плану [NUN] при экспоненциальном распределении наработки z равна T_2 [9]:

$$T_2 = \frac{1}{\lambda + \mu} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i}.$$

Учитывая, что $\sum_{i=1}^N \frac{1}{i} = \ln N + 0,577$, получим

$$T_2 = \frac{1}{\lambda + \mu} \ln N e^{0,577}. \quad (10.18)$$

Сравнивая между собой продолжительности испытаний T_1 и T_2 при фиксированных N и r , видим, что относительная эффективность E_r равна:

$$E_r = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N+0,5}{N-r+0,5}}{\frac{1}{\lambda + \mu} \ln N e^{0,577}} = \frac{N}{r} \frac{\ln \frac{N+0,5}{N-r+0,5}}{\ln N e^{0,577}}.$$

Последнее равенство следует из того факта, что

$$\frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{N} = v.$$

В работе [9] приведены значения E_r для $N=8;10;12;20;30;40$; и $0 < v \leq 1$.

При $0 < v < 1$ $E_r < 1$, следовательно, план испытаний [NUr] предпочтительней плана [NUz] по критерию минимума продолжительности испытаний при фиксированных N и r .

Сравним эти планы испытаний по критерию стоимости испытаний.

Стоимости испытаний по планам [NUr] и [NUz] равны соответственно S_1 и S_2 :

$$S_1 = cN_1T_1; \quad (10.19)$$

$$S_2 = cN_2T_2, \quad (10.20)$$

где c - стоимость проведения испытаний одного изделия за единицу времени;

N_1, N_2 - объемы выборок, необходимые для обеспечения заданных значений точности δ и достоверности γ в оценке средней наработки до отказа по планам [NUr] и [NUz] соответственно.

Число объектов испытаний N_1 для плана [NUr] равно:

$$N_1 = \frac{r}{v}, \quad (10.21)$$

где r находят из выражения:

$$\delta \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-\gamma}(2r)}{2r}. \quad (10.22)$$

Здесь $\chi^2_{1-\gamma}(2r)$ - квантиль распределения хи - квадрат с 2 степенями свободы уровня $1 - \gamma$.

Для плана [NUz] объем выборки N_2 находят из выражения:

$$\delta \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-\gamma}(2N_2)}{2N_2}. \quad (10.23)$$

Подставляя в (10.19) и (10.20) значения T_1 и T_2 , вычисленные по формулам (10.17) и (10.18), значения N_1 и N_2 , найденные из выражений (10.21), (10.22) и (10.23), вычисляют S_1 и S_2 . Таким образом, относительная эффективность равна:

$$E_s = \frac{S_1}{S_2} = \frac{cN_1T_1}{cN_2T_2} = \frac{N_1}{N_2} \frac{\ln\left(\frac{N_1 + 0,5}{N_1 - r + 0,5}\right)(\lambda + \mu)}{v \ln N_2 e^{0,577}}. \quad (10.24)$$

Учитывая (10.21), для фиксированного значения v находим

$$E_s = \frac{N_1}{N_2} \frac{\ln\left(\frac{1 + 0,5}{1 - v + 0,5/N_1}\right)}{v \ln N_2 e^{0,577}}. \quad (10.25)$$

Значения E_s в зависимости от γ , δ и ν представлены в работе [9].

При $0,35 < \nu < 1$ $E_s < 1$, и, следовательно, план [NUr] эффективнее плана [NUz] по критерию минимума стоимости проведения определительных испытаний.

При $0 < \nu < 0,175$ $E_s > 1$, а значит, план [NUz] эффективней плана [NUr].

При $0,175 \leq \nu \leq 0,35$ предпочтительность плана испытаний определяется по графикам [9] в зависимости от значений γ и δ .

Сравнение планов испытаний [NUr] и [NUz] дает возможность выбирать наиболее рациональный план по одному или нескольким интересующим критериям.

Методика расчетов параметров планов испытаний приведена в работе [4].

Другой задачей, возникающей при испытаниях на надежность изделий, в том числе и нефтепромыслового оборудования, является расслоенность партии, которая обусловлена тем, что за рассматриваемый период могут изменяться в допустимых пределах параметры исходных материалов, модернизироваться оборудование, совершенствоваться технология изготовления и т.п. В результате партия изделий с точки зрения надежности не может рассматриваться как однородная. Такую неоднородную совокупность (партию) делят на подсовокупности (слои), каждая из которых внутренне однородна. Например, продукция, выпущенная из одной партии сырья, может составлять слой.

В силу отмеченных причин при вычислении объема выборки необходимо учитывать объем партии изделий, из которой отбирается выборка.

Рассмотрим типичную ситуацию, когда ресурс изделий подчиняется нормальному закону распределения. Для случая неограниченного объема партии N объем выборки n при плане испытаний [NUN] вычисляется по формуле [37]:

$$\frac{t_q(n-1)}{\sqrt{n}} = \frac{\delta}{V}, \quad (10.26)$$

где $t_q(n-1)$ - квантиль распределения Стьюдента с $n-1$ степенью свободы уровня q ;

δ - относительная ошибка в оценке среднего ресурса;

V - коэффициент вариации.

Для вычисления объема выборки из партии конечного объема необходимо использовать формулу [8]:

$$n = \frac{t_q^2 (n-1) V^2 N}{\delta^2 N + t_q^2 (n-1) - V^2}. \quad (10.27)$$

При больших значениях N формулы (10.26) и (10.27) совпадают. Однако, для небольших значений N объемы выборок разнятся. Например, объем выборки, вычисленный по формуле (10.26) для $q = 0,9$, $\delta = 0,1$ и $V = 0,3$, равен 15, а с учетом объема партии $N = 35$ - равен 10.

Учет неоднородности партии продукции при испытаниях на надежность реализуется путем применения метода случайного расслоенного отбора изделий в выборку.

Объем подвыборки n_i из i -го слоя вычисляется по формулам:
- для выборки, пропорциональной объему слоев:

$$n_i = n \frac{N_i}{\sum_{i=1}^k N_i}; \quad (10.28)$$

- для выборки с учетом изменчивости контролируемого показателя надежности в слоях:

$$n_i = n \frac{V_i N_i}{\sum_{i=1}^k V_i N_i}; \quad (10.29)$$

где N_i - объем слоя;

k - число слоев в партии;

V_i - ожидаемое значение коэффициента вариации ресурса в i -том слое.

Например: в условиях вышеприведенного примера определить объем каждого слоя, если вся продукция распределена на 4 однородных группы (слоя):

группа 1 - 7 изделий;

группа 2 - 3 изделия;

группа 3-10 изделий;

группа 4-15 изделий.

Так как партия неоднородна, то формирование выборки необходимо проводить методом расслоенного отбора с учетом наличия четырех слоев.

Определим объем подвыборки, которую нужно сформировать из изделий первого слоя:

$$n_1 = n \frac{N_1}{N} = 10 \frac{7}{35} = 2.$$

Аналогично определим:

$$n_2 = n \frac{N_2}{N} = 10 \frac{3}{35} \approx 1;$$

$$n_3 = n \frac{N_3}{N} = 10 \frac{10}{35} \approx 3;$$

$$n_4 = n \frac{N_4}{N} = 10 \frac{15}{35} \approx 4.$$

Таким образом, в выборке объема 10 единиц должны присутствовать 2 изделия из первого слоя, 1 изделие из второго слоя, 3 изделия из третьего слоя и 4 изделия из четвертого слоя.

Учет отмеченных особенностей позволяет более корректно планировать и организовывать испытания на надежность.

В заключение необходимо отметить, что надежность крупных систем, как правило, определяется большим числом технических, экономических, технологических, экологических и социальных факторов. В работе [38], например, эти факторы разбиты на пять групп: надежность оборудования, качество технического обслуживания, структура системы, управление системой, условия функционирования. Поэтому при ускоренных испытаниях не всегда удастся в полной мере учесть все факторы, влияющие на надежность комплексов и крупных систем.

10.4. Предварительная оценка результатов испытаний

Работы по обобщению и предварительной обработке статистических данных об отказах оборудования, особых затруднений не вызывают. В опубликованной литературе [11] имеются необходимые рекомендации по сбору и обработке статистических данных, выявлению эмпирических функций распределения, определению точности и достоверности статистических оценок. Имеются стандартные программы по обработке статистической информации. В то же время недостаточное применение находит оценка рассеяния случайных величин с применением коэффициента вариации, равного отношению среднеквадратического отклонения σ_x к математическому ожиданию случайной величины m_x .

В отличие от среднеквадратического отклонения коэффициент вариации, являясь безразмерным показателем, позволяет сравнивать между собой отдельные выборки, полученные в различных условиях.

Как было выше отмечено, при анализе надежности механических систем наиболее часто встречаются следующие законы распределения вероятностей случайных величин: усеченный нормальный, Вейбулла, экспоненциальный; несколько реже - закон Релея, логарифмически нормальное и гамма-распределение.

Среди указанных законов распределения в силу своей универсальности важное место занимает распределение Вейбулла.

Коэффициент вариации при распределении Вейбулла определяется следующим соотношением [11]:

$$V = \frac{\sigma_x}{m_x} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)\right]^2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}, \quad (10.30)$$

где m - параметр распределения Вейбулла;

$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} z^{x-1} e^{-z} dz$ - гамма-функция, значения которой табулированы.

Как видно, зависимость (10.30) устанавливает связь между коэффициентом вариации V и параметром распределения Вейбулла m и от времени t не зависит. Поэтому она может быть использована для оценки параметров распределения по статистическим данным, исходя из выборочного значения коэффициента вариации

$$V^* = \frac{\sigma}{\bar{T}_1}.$$

По известному значению V^* расчетным путем или по номограмме (рис.10.2), полученной по зависимости (10.30), находится величина параметра m распределения Вейбулла. Второй параметр a , с учетом известного значения средней наработки до отказа $\bar{T}_1$, определяется из формулы

$$\bar{T}_1 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{a^{1/m}} \quad \text{или} \quad a = \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{\bar{T}_1} \right]^m.$$

Известно, что наиболее характерными для распределения Вейбулла являются значения параметра $m = 1; 2; 3,5$. При параметре $m = 1$ распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное. При $m = 3 \dots 3,5$ распределение Вейбулла можно приближенно считать нормальным. Область $m = 2$ (см. рис.10.2) характерно для распределения Релея.

Анализ полученных соотношений параметра распределения Вейбулла m и коэффициента вариации V показывает:

при $m = 1$ $V = 1$; при $m = 2$ $V \approx 0,52$;
при $m = 3,5$ $V \approx 0,31$.

Номограмма для оценки коэффициента вариации V по известному параметру m распределения Вейбулла

	m	V	
Экспоненциальный закон	1,00	1,00	Диапазон действия закона Вейбулла
	1,10	0,90	
	1,20	0,84	
	1,30	0,78	
	1,40	0,72	
	1,50	0,68	
Закон Релея	1,75	0,58	
	2,00	0,52	
	2,25	0,47	
	2,50	0,43	
	2,75	0,39	
	3,00	0,36	
Нормальный закон	3,25	0,33	
	3,50	0,31	

Рис. 10.2.

Оценка коэффициента вариации для случая усеченного нормального распределения достаточно полно рассмотрена в работе [11]. Показано, что в диапазоне изменений отношения $b_0 = \frac{a_0}{\sigma_0}$ (где

a_0 и σ_0 - параметры усеченного нормального распределения) от 0,5 до 4 коэффициент вариации изменяется от 1 до 2,5.

При распределении Релея $V = \frac{\sqrt{2 - \pi/2}}{\sqrt{\pi/2}}$. В этом случае значение коэффициента вариации $V \approx 0,52$ (что совпадает с приведенным выше его значением при параметре $m = 2$ распределения Вейбулла).

При гамма-распределении коэффициент вариации определяется:

$$V = \frac{1}{\sqrt{K}},$$

где K - параметр распределения, характеризующий асимметрию и эксцесс.

Для гамма-распределения при параметре $K = 1$ также характерно $V = 1$, т.е. и это распределение в данном случае превращается в экспоненциальное распределение. При $K > 1$ интенсивность отказов возрастает, а при $K < 1$ - убывает. При $K < 1$ гамма-распределение считается удобной характеристикой времени возникновения отказов систем в период приработки. Однако, коэффициент вариации при этом (в области положительных значений K) имеет значение $V > 1$ (при $K = 0,9$) и даже $V > 3$ (при $K = 0,1$), что указывает на значительное рассеяние статистических данных.

Для оборудования, различающегося по конструкции, технологии изготовления, условиям эксплуатации, а следовательно, и по категориям отказов, выборочные значения коэффициента вариации естественно могут различаться. Для оценки существенности различия V_1^* и V_2^* используется t - критерий Стьюдента

$$t = \frac{|V_1^* - V_2^*|}{\sqrt{\frac{(V_1^*)^2}{2n_1} + \frac{(V_2^*)^2}{2n_2}}},$$

где n_1 и n_2 - объемы выборок.

При $t > 3$ различия в значениях коэффициентов вариации полагают значимым. При $t < 3$ различие в значениях V_1^* и V_2^* не является существенным.

Наряду с этим, приведенные выше значения коэффициента вариации, характерные для рассмотренных законов распределения, дают возможность судить о категориях отказов, а в случаях заметного расхождения выборочного значения V^* с ожидаемым, принимать решение о необходимости проверки качества и однородности статистической информации.

Систематизация накопленных статистических данных об отказах нефтепромыслового оборудования позволяет сформулировать некоторые рекомендации по характерным значениям коэффициента вариации V и области их использования применительно к механическим системам. Случаи с значениями $V^* \leq 0,3 \div 0,35$, полученные по данным эксплуатации, являются достаточно хорошими по стабильности наработок объектов исследований. При $V^* \leq 0,35 \div 0,5$ полученные результаты могут быть признаны удовлетворительными. Значения $V^* > 0,5$ указывают прежде всего на возможность преобладания внезапных отказов в потоке, что для механических систем является следствием неотработанности конструкции, нестабильности качества изготовления или же нарушений режимов эксплуатации оборудования.

Важным является также оценка сложных восстанавливаемых изделий с помощью комплексных показателей надежности: коэффициентов готовности и технического использования, которые в отличие от единичных показателей надежности характеризуют несколько свойств, составляющих надежность, например, безотказность и ремонтпригодность.

Безотказная работа сложных восстанавливаемых систем зависит от многих факторов: от выполнения всех требований по применению объекта по назначению, по монтажу и транспортированию, от уровня технологического процесса и др. В результате может отмечаться значительный разброс статистических данных и, как следствие, показателей надежности.

11. Повышение технического уровня и надежности нефтепромышленного оборудования

11.1. Рекомендации по составу и порядку выполнения работ по обеспечению надежности изделий техники

Рекомендации распространяются на изделия всех видов техники (далее - изделия). Рекомендации предназначены для работников научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, предприятий и организаций, разрабатывающих, изготавливающих, испытывающих и эксплуатирующих изделия [42].

11.1.1. Общие положения

1.1. Надежность изделий должна обеспечиваться разработкой, реализацией и контролем организационных и научно-технических мероприятий, направленных на выполнение заданных требований к надежности изделий.

1.2. Требования к надежности устанавливает заказчик (потребитель) по согласованию с разработчиком (изготовителем) с учетом уровня надежности лучших отечественных и зарубежных аналогов (прототипов) и экономических, экологических и других факторов.

1.3. Выполнение требований к надежности изделий должно подтверждаться расчетами на этапе проектирования, испытаниями опытных образцов (партий) и контролироваться при серийном изготовлении и плановом ремонте изделий, а также в период их эксплуатации.

Работы по обеспечению надежности должны быть неотъемлемыми и обязательными составляющими работ по разработке, изготовлению, ремонту и эксплуатации изделий.

1.4. Для обеспечения надежности изделий на различных стадиях жизненного цикла, в том числе разработки, изготовления, эксплуатации, плановых ремонтов, должны быть предусмотрены и реализованы основные виды работ:

- обоснование требований к надежности изделия в целом и распределение этих требований по его составным частям;
- расчет (прогнозирование) надежности изделия, его составных частей и комплектующих элементов, исходя из принятых схемно-конструктивных решений, режимов и условий применения, стратегии технического обслуживания и ремонта;

- экспериментальная отработка и испытания изделия и (или) его составных частей на надежность для условий и режимов, наиболее полно соответствующих условиям реальной эксплуатации;

- анализ принятого технологического процесса и контроль важнейших технологических операций с точки зрения обеспечения изготовления изделия и его составных частей с заданными показателями надежности;

- анализ принятых правил эксплуатации изделия, эксплуатационных и ремонтных документов, а также контроль правильности использования техники и выполнения операций технического обслуживания и ремонта в процессе эксплуатации с точки зрения обеспечения заданной надежности изделия;

- контроль фактического уровня надежности изделий при эксплуатации.

1.5. Для осуществления координации, планирования и контроля выполнения указанных работ по обеспечению надежности изделий разрабатывают программы обеспечения надежности, содержащие все необходимые организационные, конструкторские, технические, технологические и эксплуатационные мероприятия.

11.1.2. Состав работ по обеспечению надежности на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

2.1. На этой стадии выполняют основные работы по обеспечению надежности изделия:

- анализ, выбор номенклатуры и нормирование показателей надежности изделия с учетом особенностей его схемно-конструктивного исполнения, режимов и условий эксплуатации, а также надежности лучших отечественных и зарубежных аналогов, составных частей, комплектующих элементов, конструкций, материалов и др.;

- анализ возможных схемно-конструктивных вариантов построения изделия, установление критериев отказов, предельных состояний и расчет надежности для каждого из них, выбор оптимального (по надежности) варианта;

- разработка и обоснование требований к надежности составных частей и комплектующих элементов;

- выбор конструкционных материалов и комплектующих элементов с учетом требований к надежности изделия;

- разработка методов и средств контроля технического состояния (диагностирования);

- разработка мероприятий, обеспечивающих необходимую стойкость изделия к внешним воздействующим факторам, выявление составных частей, критичных к внешним воздействующим факторам;
- уточненная расчетная оценка (прогнозирование) показателей надежности изделия в целом и его составных частей;
- разработка программ и методик испытаний на надежность опытного образца (партии);
- экспериментальная отработка и испытания на надежность опытных образцов, узлов, устройств и изделия в целом;
- анализ причин отказов и повреждений опытных образцов, разработка мероприятий по их устранению;
- выбор структуры и стратегии пополнения комплекта запасных частей (ЗИП), расчет начальных запасов в нем, показателей достаточности и суммарных затрат на запасные части и инструменты;
- анализ предложенных конструктором правил эксплуатации, эксплуатационной и ремонтной документации с точки зрения обеспечения надежности;
- выбор и обоснование системы сбора и обработки информации о надежности изделия и его составных частей на различных стадиях жизненного цикла;
- разработка программы обеспечения надежности;
- анализ предлагаемой технологии изготовления и планового ремонта изделия с точки зрения обеспечения заданных требований к надежности или разработка требований к технологии изготовления (ремонта);
- разработка (при необходимости) методических, технических и инструктивных документов по реализации.

11.1.3. Состав работ по обеспечению надежности на стадии серийного изготовления

3.1. На стадии серийного изготовления изделия выполняют основные работы по обеспечению его надежности:

- анализ выбранной технологии серийного изготовления с точки зрения обеспечения заданных требований к надежности;
- разработка методов пооперационного контроля и системы статистического регулирования технологического процесса на важнейших операциях;

- входной контроль комплектующих элементов и материалов;
- контроль технологических операций изготовления (в т.ч. технологических прогонов), влияющих на надежность изделия;
- анализ надежности технологического оборудования и стабильности технологического процесса изготовления по параметрам качества изготавливаемых изделий;
- разработка программ и методик испытаний на надежность;
- проведение испытаний на надежность, анализ их результатов, причин отказов и повреждений, разработка мероприятий по их устранению;
- сбор, обработка и анализ информации о дефектах изделия при изготовлении, его и технологического оборудования;
- анализ информации о надежности изделий в эксплуатации и разработка необходимых мероприятий.

Примечание. При проведении плановых ремонтов на ремонтных предприятиях выполняют работы, перечисленные в разделе 11.1.3, с учетом опытно-конструкторской работы по ремонту.

11.1.4. Состав работ по обеспечению надежности на стадии эксплуатации

4.1. На стадии эксплуатации изделия выполняют основные работы по обеспечению его надежности:

- контроль за соблюдением режимов, условий и правил эксплуатации (применения изделия по назначению, хранения, транспортирования, технического обслуживания и ремонта, особенно в начальный период эксплуатации);
- анализ принятой системы технического обслуживания и ремонта изделия и разработка предложений по их совершенствованию в целях обеспечения и повышения надежности;
- сбор, анализ и обработка эксплуатационной информации о надежности изделия, анализ причин отказов, повреждений и переходов в предельное состояние, разработка и проведение мероприятий по их устранению;
- обучение (при необходимости) обслуживающего операторского персонала передовым методам эксплуатации изделия; разработка программ и средств обучения.

11.1.5. Содержание, порядок разработки, согласования, утверждения и оформления программы обеспечения надежности

5.1. Программа обеспечения надежности является документом, устанавливающим необходимые организационно-технические мероприятия по комплексу работ, указанных в п.1.4.

5.2. Необходимость разработки программы устанавливают в техническом задании (ТЗ) по согласованию между заказчиком (потребителем) и головным разработчиком (изготовителем).

Программа обеспечения надежности может разрабатываться в виде самостоятельных документов на стадии разработки, изготовления, капитального ремонта и эксплуатации или включать все стадии. Для соисполнителей и поставщиков программы следует разрабатывать в виде самостоятельных документов или включать в общую программу обеспечения надежности.

5.3. Программу следует разрабатывать для: конкретного изделия; составных частей или комплектующих элементов; обеспечения отдельных свойств (показателей) надежности; конкретных технологий или технологических операций.

5.4. Мероприятия (табл. 11.1) во всех случаях должны быть конкретными и четко направленными на обеспечение (выполнение, подтверждение, контроль, повышение) требований к надежности, установленных в нормативно-технической документации (НТД) и руководящем документе (РД).

Таблица 11.1

Типовая форма программы обеспечения надежности (ПОН) [42]

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

ПРОГРАММА

Обеспечение надежности _____

наименование изделия

наименование этапа, если нужно

Перечень мероприятий по обеспечению надежности

Этапы	Мероприятия ПОН	Срок исполнения	Исполнители	Вид отчетных документов	НТД и РД

5.5. Разработку, согласование, в т.ч. с заказчиком, и утверждение программы обеспечения надежности, а также контроль за выполнением осуществляют в порядке, установленном в отрасли.

5.6. Программу оформляют в соответствии с требованиями, установленными в отрасли, или в соответствии с мероприятиями (см. табл. 11.1).

5.7. Содержание мероприятий для конкретного изделия определяют с учетом приведенного ниже типового перечня мероприятий по обеспечению надежности.

5.8. При необходимости программа обеспечения надежности может корректироваться на любом этапе реализации по согласованию с заказчиком.

11.1.6. Типовой перечень мероприятий по обеспечению надежности

Техническое предложение. Анализ информации о надежности отечественных и зарубежных аналогов с учетом режимов работы и условий эксплуатации.

Предварительный выбор номенклатуры и уровня показателей надежности основных составных частей, оценка ожидаемого уровня надежности изделия и основных составных частей, обоснование выбранного схемно-конструктивного варианта. Составление раздела по надежности пояснительной записки.

Разработка эскизного проекта. Разработка программы обеспечения надежности. Анализ требований к изделию, установленных в техническом задании (ТЗ), выбор схемно-конструктивных решений, обеспечивающих выполнение заданных требований к надежности изделия.

Разработка математических моделей надежности для решения задач нормирования и оценки надежности. Распределение требований к надежности составных частей, исходя из требований к изделию. Составление разделов по надежности технических заданий на разработку составных частей. Разработка необходимых нормативно-технических и организационно-методических документов по нормированию, расчету надежности, анализу причин неисправности, оценке и контролю надежности изделий.

Моделирование процесса функционирования изделия в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Оценка влияния внешних воздействующих факторов на надежность изделия, выбор соответствующих способов защиты.

Выявление составных частей и комплектующих изделий межотраслевого применения лимитирующих надежность.

Составление перечня критериев отказов и предельных состояний.

Анализ информации о надежности изделий-аналогов по данным эксплуатации. Контроль перечней комплектующих изделий, рекомендованных к применению, на соответствие требованиям к надежности.

Составление перечней, применяемых комплектующих изделий с ограниченными сроками службы и ресурсом.

Анализ влияния последствий отказов составных частей и комплектующих изделий на работоспособность изделия. Выбор и обоснование конструктивных способов обеспечения надежности, разработка мероприятий по предупреждению возникновения отказов и защите от их последствий.

Планирование экспериментальной отработки изделий с учетом заданного уровня надежности.

Разработка программ и проведение испытаний макетов составных частей и макета изделия в целом для предварительной оценки выполнения требований к надежности и определения запасов работоспособности. Выбор принципа резервирования для обеспечения выполнения заданных требований.

Предварительный расчет надежности изделия, оценка соответствия требованиям, установленным в ТЗ.

Предварительный выбор и обоснование системы контроля исправности в процессе эксплуатации. Предварительное определение состава технических характеристик, подлежащих проверке при диагностировании, необходимых средств диагностирования.

Предварительное определение способов и объема технического обслуживания с учетом принятой системы эксплуатации.

Предварительное определение структуры и состава комплексов ЗИП, стратегии их пополнения и показателей достаточности. Контроль реализации программы обеспечения надежности составных частей.

Составление раздела по надежности пояснительной записки с указанием результатов проведенных работ по программе обеспечения надежности на этапе эскизного проектирования.

Составление отчета о реализации программы на этапе эскизного проектирования.

Разработка технического проекта. Корректировка программы обеспечения надежности (при необходимости).

Уточнение схемно-конструктивного построения изделия для обеспечения выполнения заданных в ТЗ требований к надежности.

Уточнение математических моделей надёжности по результатам схемной и конструктивной отработки изделия.

Разработка карт рабочих режимов.

Уточнение объема экспериментальной отработки.

Разработка программ и проведение испытаний макетов для определения влияния на надежность условий и режимов эксплуатации, а также оценки соответствия изделий требованиям к надежности.

Составление перечня комплектующих изделий, лимитирующих надежность изделия и подлежащих входному контролю.

Оценка надежности комплектующих изделий. Расчет тепловых режимов, выбор способов охлаждения (обогрева).

Выбор способов защиты от внешних воздействующих факторов для обеспечения заданной надежности.

Уточнение расчетов надежности изделия (при необходимости), оценка соответствия ожидаемого уровня надежности требованиями ТЗ.

Уточнение системы контроля исправности изделия в процессе эксплуатации.

Анализ принятой системы эксплуатации и предлагаемой системы ТО с позиций обеспечения заданной надежности.

Уточнение состава технических характеристик, подлежащих проверке при диагностировании, а также требований к средствам диагностирования.

Уточнение структуры и состава комплектов ЗИП, параметров, стратегии их пополнения и уровня показателей достаточности. Предварительный расчет ЗИП. Оценка ремонтпригодности и целесообразности проведения ремонтов в процессе эксплуатации.

Анализ технологии изготовления составных частей с точки зрения обеспечения надежности изделия.

Контроль реализации программы обеспечения надежности составных частей.

Составление раздела по надежности пояснительной записки с указанием результатов проведенных работ на этапе технического проектирования.

Составление отчета о реализации программы обеспечения надежности на этапе технического проектирования.

Разработка рабочей документации. Изготовление опытного образца (партии). Проведение предварительных и приемочных испытаний.

Корректировка программы обеспечения надежности (при необходимости).

Анализ технологии изготовления опытного образца и инструкций по выполнению важнейших с точки зрения обеспечения надежности технологических операций.

Анализ технологичности изделия, оценка влияния технологичности на надежность изделия.

Уточнение перечня комплектующих изделий, лимитирующих надежность изделия, сбор и обобщение информации об их надежности по результатам входного контроля.

Контроль полноты реализации в конструкторской документации опытного образца (опытной партии) конструктивных способов обеспечения надежности изделия. Контроль соблюдения конструкторской документации при изготовлении опытного образца (опытной партии).

Разработка программ и методик испытаний изделия на надежность (предварительных и приемочных).

Разработка (при необходимости) специального испытательного оборудования и средств контроля для проведения испытаний на надежность опытного образца (опытной партии).

Уточнение модели эксплуатации и карт рабочих режимов изделия, проверка тепловых режимов сборочных единиц и комплектующих изделий с точки зрения обеспечения надежности изделия.

Анализ соответствующих разделов эксплуатационной и ремонтной документации, устанавливающих требования по обеспечению надежности на стадии эксплуатации.

Экспериментальная проверка алгоритмов функционирования (при необходимости), работоспособности в условиях экстремальных внешних воздействий и нагрузок, проверка запаса по ресурсу в нормальных условиях, проверка эффективности мероприятий и средств защиты от отказов.

Анализ информации о результатах предварительных испытаний опытного образца (опытной партии), оценка соответствия изделий заданным требованиям к надежности.

Сбор и обработка информации о надежности составных частей и комплектующих изделий по результатам испытаний и входного контроля.

Выявление причин возникновения неисправностей изделия (изделий), разработка мероприятий по их устранению.

Корректировка конструкторской и технологической документации по результатам отработки и предварительных испытаний для обеспечения заданного уровня надежности изделия.

Контроль реализации программы обеспечения надежности составных частей.

Оценка по результатам приемочных испытаний соответствия опытного образца (опытной партии) заданным ТЗ требованиям к надежности.

Составление отчета о реализации программы обеспечения надежности. Разработка предложений по корректировке содержания программы (при необходимости).

Постановка на производство. Разработка программы обеспечения надежности с учетом предложений головного разработчика.

Проверка подготовленности производства к выпуску изделий с требуемым уровнем надежности, разработка и выполнение мероприятий по ликвидации отклонений от документации, влияющих на уровень надежности изделий.

Разработка системы операционного контроля и статистического регулирования технологического процесса изготовления изделий на важнейших операциях, влияющих на надежность.

Организация учета информации о неисправностях, выявленных в процессе изготовления изделий.

Разработка (при необходимости) и изготовление (приобретение) специального оборудования, средств контроля и измерений для проведения испытаний на надежность, если они предусмотрены.

Разработка режимов технологических тренировок, контроль их соблюдения, корректировки при необходимости.

Разработка необходимых документов по обеспечению надежности в процессе изготовления изделий.

Разработка методики и оценка соответствия изделий требованиям к надежности по результатам испытаний установочной серии (оценка надежности изделий по результатам испытаний установочной серии).

Анализ причин возникновения неисправностей, выявленных при изготовлении и испытаниях установочной серии, разработка мероприятий по их устранению. Корректировка при необходимости конструкторской и технологической документации для устранения выявленных недостатков. Оценка эффективности проведенных мероприятий.

Сбор и обработка информации о надежности составных частей и комплектующих изделий по результатам входного контроля и испытаний установочной серии.

Обобщение результатов испытаний, разработка предложений по содержанию программы обеспечения надежности (при необходимости).

Обучение кадров передовому опыту организации работ по обеспечению надежности изделий в процессе изготовления, аттестация персонала.

Контроль реализации программы обеспечения надежности составных частей головным изготовителем образца.

Составление отчета о реализации программы на этапе поставки на производство.

Установившееся серийное производство. Корректировка программы обеспечения надежности (при необходимости).

Контроль за соблюдением требований конструкторской и технологической документации, выявление и устранение нарушений, влияющих на надежность изделий.

Проведение технологических тренировок и прогонов, организация и проведение периодических испытаний на надежность.

Сбор и обработка информации о надежности изделий по результатам изготовления, испытаний и эксплуатации.

Сбор и обработка информации о надежности составных частей и комплектующих изделий по результатам входного контроля и испытаний. Оценка надежности изделий по результатам испытаний (оценка соответствия изделий требованиям к надежности).

Анализ причин неисправностей (снижения надежности изделий), разработка и проведение мероприятий по их устранению, в т.ч. определение необходимости и корректировка документации на изделия, проведение испытаний для проверки влияния вносимых изменений на надежность изделий, оценка эффективности проведенных мероприятий.

Обучение и периодическая аттестация персонала подразделений, выполняющих мероприятия программы обеспечения надежности составных частей, и контроль их реализации головным изготовителем изделия.

Составление периодических отчетов о реализации программы (за отчетный период).

Ввод в эксплуатацию. Разработка программы обеспечения надежности (с учетом предложений по содержанию программы,

составленных по результатам разработки или освоения производства образца).

Организация и проведение обучения персонала эксплуатирующей организации правилам обеспечения надежности изделия в процессе эксплуатации.

Разработка дополнительных нормативно-технических и организационно-методических документов по обеспечению надежности на стадии эксплуатации (при необходимости).

Подготовка места эксплуатации и необходимого оборудования для выполнения мероприятий, предусмотренных в программе обеспечения надежности.

Организация учета информации о неисправностях изделия при хранении, транспортировании, использовании по назначению, ТО, текущем и среднем ремонте.

Анализ информации о неисправностях, выявленных в процессе проведения работ по вводу в эксплуатацию, разработка и проведение мероприятий по устранению выявленных недостатков.

Организация работ по сбору и обработке информации о надежности, разработка соответствующих документов (если указанные работы не проведены ранее).

Эксплуатация. Программы обеспечения надежности (если необходимость разработки программы выявлена по результатам ввода в эксплуатацию).

Проведение мероприятий по обеспечению надежности изделия на стадии эксплуатации, предусмотренных эксплуатационной и ремонтной документацией.

Контроль за соблюдением правил эксплуатации, своевременное выявление и устранение нарушений.

Сбор и обработка информации о надежности изделия (составных частей и комплектующих изделий при необходимости) по результатам эксплуатации.

Анализ информации о выявленных неисправностях, разработка и проведение мероприятий по устранению причин возникновения неисправностей. Выявление необходимости и корректировка соответствующей документации. Разработка бюллетеней и проведение работ по бюллетеням (при необходимости).

Проведение авторского надзора, если он предусмотрен.

Проведение мероприятий по исследованию надежности изделия в реальных условиях и режимах эксплуатации.

Организация и проведение подконтрольной эксплуатации.

Проведение дополнительных мероприятий по обеспечению надежности с учетом предложений по содержанию программы обеспечения надежности (выявление необходимости и внедрение новых прогрессивных технологических процессов, оборудования, средств контроля и измерений, методологии испытаний и оценки надежности, применение комплектующих изделий с улучшенными характеристиками надежности и т. п.).

Оценка надежности изделия по результатам эксплуатации, сбор и распределение итоговой информации о надежности изделия (составных частей и комплектующих изделий - при необходимости). Оценка эффективности проведенных мероприятий по обеспечению надежности изделия.

Корректировка состава ЗИП, уточнение объема и периодичности ТО и ремонтов по данным эксплуатации.

Составление периодических отчетов о реализации программы обеспечения надежности на контрольных этапах периода эксплуатации.

Опытно-конструкторские работы по ремонту.

Анализ ремонтпригодности изделия, разработка предложения по ее повышению с точки зрения приспособленности изделия к проведению капитального ремонта.

Анализ информации о неисправностях и опыте ремонта изделия-аналога, надежности отремонтированных изделий - аналогов.

Обоснование и установление требований к надежности отремонтированных изделий в ремонтной документации.

Разработка программы и методики испытаний на надежность установочной партии отремонтированных изделий.

Разработка методики оценки надежности по результатам опытного ремонта. Проведение испытаний отремонтированных изделий, оценка их соответствия установленным требованиям к надежности.

Корректировка ремонтной документации по результатам опытного ремонта и испытаний отремонтированных изделий. Разработка методики оценки технического состояния изделий, поступающих в капитальный ремонт.

Разработка предложений по содержанию программы обеспечения надежности.

Постановка на капитальный ремонт. Разработка программы обеспечения надежности (с учетом предложений исполнителя опытно-конструкторских работ по ремонту).

Подготовка ремонтного производства к выполнению мероприятий по обеспечению заданного уровня надежности отремонтированных изделий.

Организация и проведение обучения персонала правилам обеспечения надежности изделий при проведении капитального ремонта.

Разработка необходимых нормативно-технических и организационно-методических документов.

Разработка программы и методики проведения испытаний на надежность установочной ремонтной серии, если они предусмотрены, методики оценки соответствия отремонтированных изделий требованиям к надежности по результатам испытаний установочной серии.

Проведение испытаний, анализ их результатов, устранение выявленных недостатков, корректировка ремонтной документации (при необходимости).

Сбор и обработка информации о надежности комплектующих изделий по результатам входного контроля и испытаний установочной ремонтной серии.

Оценка соответствия изделий установочной ремонтной серии требованиям к надежности.

Составление отчета о реализации программы обеспечения надежности при постановке на капитальный ремонт.

Серийное ремонтное производство. Корректировка программы обеспечения надежности (при необходимости). Оценка технического состояния изделий, поступающих в капитальный ремонт. Сбор и распределение информации о выявленных неисправностях (предельных состояний) и остаточном ресурсе изделий.

Проведение испытаний на надежность отремонтированных изделий, если они предусмотрены. Оценка соответствия отремонтированных изделий установленным требованиям по результатам испытаний и данным эксплуатации.

Сбор и обработка информации о надежности изделий по результатам ремонта, испытаний и эксплуатации.

Выявление причин возникновения неисправностей отремонтированных изделий, разработка и проведение мероприятий по их устранению. Определение необходимости и корректировка ремонтной документации, разработка бюллетеней и проведение работ по бюллетеням (при необходимости).

Оценка надежности отремонтированных изделий и эффективности проведенных мероприятий по обеспечению их надежности.

Разработка предложений по корректировке конструкторской документации с целью повышения ремонтпригодности изделий.

Разработка предложений по обеспечению (повышению) надежности изделий в процессе эксплуатации (по содержанию программы при необходимости).

Составление периодических отчетов о реализации программы обеспечения надежности на контрольных этапах ремонтного производства (например ежегодных).

11.2. Повышение надежности путем поэтапного совершенствования конструкции

В соответствии с требованиями эксплуатации проблема повышения технического уровня и надежности нефтепромыслового оборудования может решаться в двух основных направлениях. Первое направление - это создание новых типов оборудования повышенной производительности на основе новых инженерно-технических решений. Другим направлением является совершенствование существующего оборудования на основе анализа статистической информации об отказах путем отработки конструкций отдельных составных частей и применения современных конструкционных материалов.

Для второго направления характерным является модернизация определенных составных частей, что позволяет исключить наиболее частые преждевременные (особенно внезапные) отказы.

В этом случае имеется возможность достижения повышения общей функциональной надежности не только за счет повышения уровня безотказности, но и снижения времени, затрачиваемого на устранение отказов. То есть при совершенствовании конструкций повышения надежности можно достигнуть за счет [28]:

1. повышения безотказности; например, средней наработки между отказами $\bar{T}$;
2. улучшения ремонтпригодности снижением среднего времени восстановления $\bar{\tau}_в$;
3. одновременного повышения $\bar{T}$ и снижения $\bar{\tau}_в$.

Как было выше показано, с количественными показателями $\bar{T}$ и $\bar{\tau}_n$ связан коэффициент готовности K_r , определяемый по зависимости (2.30), которую можно представить также в виде

$$K_r = \frac{1}{1 + \bar{\tau}_n / \bar{T}}. \quad (11.1)$$

Данная зависимость позволяет оценить достигнутый уровень надежности за счет снижения отношения $\bar{\tau}_n / \bar{T}$, как результат совершенствования составной части конструкции.

Для оценки надежности на стадии проектирования большое применение находит метод структурного анализа надежности, который основан на раскрытии внутренних связей элементов и исследуемого объекта в целом и установлении закономерностей этих связей (см. раздел 4).

Однако, для возможности эффективного использования метода, необходимы сведения о ремонтных оперативных затратах на восстановление работоспособности объекта, а также установленных критериях предельного состояния сборочных единиц и агрегатов и соответствующих критериях отказов. Перечисленные данные не всегда четко определимы на этапе проектирования механических систем и поэтому метод структурного анализа надежности на данном этапе на практике не всегда успешно применяется.

Более эффективным для сложных систем на стадии доводки или модернизации их составных частей является метод поэтапного совершенствования конструкции, позволяющий производить оценку надежности системы на основе параметров распределений безотказности и восстановления подсистем. Метод имеет подготовленную научно-методическую базу и апробирован при оценке и повышении надежности ряда нефтепромысловых передвижных установок [16].

Для применения данного метода структура рассматриваемого оборудования подразделяется на две составные части - подсистемы, одна из которой подлежит дальнейшему исследованию с целью повышения ее надежности.

Для оценки повышения надежности отмеченной подсистемы на этапе модернизации или проектирования, установлена аналитическая связь между характеристиками безотказности и ремонтпригодности системы в целом и ее подсистемами, с учетом функции и плотности распределения безотказности и восстановления подсистем [16].

Исходя из отмеченного, получены функции безотказности и восстановления для разработки стратегии поэтапного совершенствования конструкции в случае сочетания законов распределения: экспоненциальный - экспоненциальный, экспоненциальный - Вейбулла и нормальный - нормальный.

Совершенствование серийно выпускаемого изделия в большинстве случаев сводится к отработке конструкции отдельной (недостаточно надежной) составной части. В этом случае, при оценке ожидаемой надежности системы необходимо в качестве исходных данных использовать также значения параметров распределения подсистемы, не подвергнутой конструктивным изменениям. Для этого требуется получение аналитических зависимостей (точечных оценок) параметров различных законов распределений, характеризующих систему в целом, при известных параметрах и законах распределения времени безотказности и восстановления составных частей (подсистем).

При фиксированном значении $\tau_0 = const$ необходимо рассмотреть поэтапно повышение надежности $T + \Delta t$ (где Δt - требования к повышению технического уровня и надежности) путем разработки рекомендаций с использованием вероятностно-математических моделей.

Часто, особенно на стадиях технического задания, эскизного и технического проектов, используется однопараметрическое экспоненциальное распределение.

При этом также учитывается, что если рассматриваемая система, состоящая из большого числа элементов, имеет различные распределения наработок до отказа, то распределение наработки всей системы будет приближаться к экспоненциальному закону.

Исходя из этого, ниже приводятся расчетные зависимости для оценки характеристик безотказности и ремонтпригодности в случае подчинения двух подсистем экспоненциальному закону распределения. В качестве параметра экспоненциального распределения принимается интенсивность отказов λ .

Точечные оценки математического ожидания μ_1 и дисперсии σ_1^2 безотказности системы в целом с учетом параметров распределения подсистем представлены в виде [16]:

$$\mu_1 = \frac{1}{\lambda_{11} + \lambda_{12}} - \frac{1}{\lambda_{11} + \lambda_{12}} \exp[-(\lambda_{11} + \lambda_{12})T]; \quad (11.2)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{(\lambda_{11} + \lambda_{12})^2} - \frac{1}{\lambda_{11} + \lambda_{12}} \exp[-(\lambda_{11} + \lambda_{12})T] - \frac{1}{(\lambda_{11} + \lambda_{12})^2} \exp[-2(\lambda_{11} + \lambda_{12})T], \quad (11.3)$$

где $\lambda_{11}, \lambda_{12}$ - интенсивности отказов соответственно первого и второго подсистем;

T - назначенный период до наступления предельного состояния системы.

Аналогично для случая, когда две подсистемы подчиняются экспоненциальному закону распределения, формулы для определения точечных характеристик параметров восстановления имеют вид:

$$\mu_2 = \frac{1}{\lambda_{21} + \lambda_{22}} - \frac{1}{\lambda_{21} + \lambda_{22}} \exp[-(\lambda_{21} + \lambda_{22})\tau_B]; \quad (11.4)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{(\lambda_{21} + \lambda_{22})^2} - \frac{1}{\lambda_{21} + \lambda_{22}} \exp[-(\lambda_{21} + \lambda_{22})\tau_B] - \frac{1}{(\lambda_{21} + \lambda_{22})^2} \exp[-2(\lambda_{21} + \lambda_{22})\tau_B], \quad (11.5)$$

где $\lambda_{21}, \lambda_{22}$ - интенсивности восстановления первой и второй составных частей соответственно.

Изложенный метод расчета показателей надежности охватывает свойства - безотказности, долговечности и ремонтпригодности систем и позволяет рассчитать надежность любого нефтепромыслового оборудования, состоящего из двух подсистем, при различном сочетании законов распределения. Это позволяет решить поставленную задачу, связанную с повышением надежности на стадии проектирования.

Основой данной методики является обоснованное разделение системы на две подсистемы. В качестве подсистем в данном случае приняты: транспортная база и навесное технологическое оборудование передвижных подъемных установок, рассмотрены подсистемы установок: навесное оборудование и механизмы, предназначенные для спуско-подъемных работ.

Наряду с этим может быть использована методическая база для возможности поэтапной оценки и повышения надежности условных подсистем в виде отдельных сборочных единиц и агрегатов (например, ротора, вертлюга, редуктора станка-качалки и др.),

для которых формирование подсистем представляет определенные затруднения.

Известно, что отказы механических систем связаны с переходом отдельных деталей, сборочных единиц или отдельных агрегатов в предельное состояние, что приводит к необходимости их замены в условиях эксплуатации. Переход же в предельное состояние основных сборочных единиц и базовых деталей влечет за собой прекращение эксплуатации изделия, необходимость производства агрегатно-узлового или же капитального ремонта.

На основе анализа имеющейся информации об отказах, достаточно просто разработать классификацию по их характеру и последствиям по одному или нескольким критериям. Критериями для классификации могут служить ресурс деталей, прямые и косвенные потери, вызванные отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта в условиях эксплуатации, продолжительность простоев из-за возникновения отказов и т.п. При этом отказ одной и той же детали должен рассматриваться как с позиции самой детали, так и с позиции сборочной единицы (агрегата), в состав которой входит данная деталь.

Однако, при отсутствии явно выраженных подсистем, для их условного формирования одних перечисленных критериев недостаточно. Необходима методическая и информационная база для выбора первоочередных объектов на этапах модернизации и проектирования.

11.2.1. Формирование условных подсистем на основе категорий отказов деталей и сборочных единиц

На стадии модернизации, как правило, имеется обширный статистический материал об отказах базового оборудования, о физических причинах, вызывающих эти отказы. Ценность таких данных заключается в их высокой достоверности вследствие возможности регистрировать режимы работы оборудования, причины перехода к недопустимым видам изнашивания (заедание, усталостное изнашивание). Имеется также возможность обследования изношенных деталей и сборочных единиц, в том числе при проведении капитального ремонта, что дает возможность установить характер проявления и последствия отказов.

Определение критериев для разбивки системы на две условные подсистемы можно производить на основе выявленных доминирующих факторов функционирования изделия и анализа наработок до отказа деталей и сборочных единиц. Одним из наиболее приемлемых критериев для разбивки системы на две условные подсистемы являются категории отказов по характеру их проявления: внезапные и постепенные отказы. По определению внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров изделия. Наступлению же постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение параметров изделия. Последнее позволяет своевременно обнаруживать источники постепенного отказа, прогнозировать его развитие во времени, и следовательно, предупредить преждевременное наступление отказа путем своевременной замены деталей.

Таким образом, в подлежащую исследованию условную подсистему выделяются прежде всего детали и сборочные единицы, характеризующиеся отказами внезапного характера и низким уровнем безотказности. Во вторую подсистему выделяются детали и сборочные единицы, имеющие высокий уровень безотказности и характеризующиеся постепенными отказами.

Важным является также возможность уточнения категории отказов оборудования на основе установленных по статистическим данным законов распределения времени безотказной работы деталей и сборочных единиц. Работами многих авторов доказано, что близость функции распределения времени безотказной работы к нормальному закону характерна для случаев, когда отказы изделий относятся к категории постепенных отказов. Близость функции распределения времени безотказной работы к экспоненциальному закону характерна для деталей и сборочных единиц, отказы которых относятся к категории внезапных отказов. И, наконец, близость функции распределения времени безотказной работы к закону Вейбулла характерна для случаев, когда отказы внезапной и постепенной категорий имеют место в одном потоке отказов. В этом случае важную дополнительную информацию можно получить на основе анализа параметров распределения.

Однако, при использовании результатов обработки статистических данных следует учесть, что рассмотренные законы распределений времени безотказной работы могут характеризовать надежность сложной механической системы лишь на определенных участках времени ее работы. Так, на участке приработки время безотказной работы может подчиняться экспоненциальному закону распре-

деления, на участке длительной эксплуатации - нормальному закону и на участке старения - закону Вейбулла.

Для подтверждения эффективности формирования условных подсистем на основе категории отказов отдельных деталей и сборочных единиц ниже приведены результаты составления условных подсистем по данным об отказах буровых насосов типа У8-6М [28].

Всего было отмечено 609 отказов. Из них к отказам деталей гидравлической части насосов: клапанов, поршней и цилиндрических втулок относились 453 отказа.

Отказы штоков буровых насосов и их уплотнительных элементов, из-за постепенного, во многих случаях, их характера проявления, в данную условную подсистему не были включены. Тем самым подчеркивается, что условная подсистема не обязательно должна совпадать с выделяемой обычно из анализа конструкции объекта подсистемы.

Отказы, выделенных в первую условную подсистему деталей и сборочных единиц (клапанов, поршней и цилиндрических втулок), носят внезапный характер вследствие гидроабразивной эрозии рабочих поверхностей деталей, имеющей большую интенсивность развития.

Ко второй условной подсистеме были отнесены постепенные отказы деталей приводной части буровых насосов, которые были связаны с необходимостью регулировки накладок крейцкопфа и уплотнений контрштоков, заменой пальца крейцкопфа, затяжки болтовых соединений и др. Один из отказов был связан с обрывом клинового ремня привода насоса.

В табл. 11.2 приведены данные по 453 отказам деталей гидравлической части насосов. Для исключения влияния глубины бурения скважин статистические данные были сгруппированы по интервалам бурения: до 2000 м, 2000-3000 м и 3000-4000 м. Проверка гипотезы о совпадении законов распределения и однородности статистической информации о наработках до отказа по первой, второй и третьей группам производилась по критерию хи-квадрат.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \frac{\xi_{ij}^2}{u_{ij} \cdot N} - N, \quad (11.6)$$

где ξ - число результатов наблюдений j -ой группы, попавших в i -й интервал;

N - суммарное число отказов;

$$u_i = \frac{\Delta n_i}{N}; \quad u_j = \frac{N_j}{N};$$

Δn_i - число отказов в i -ом интервале;

N_j - число отказов в j -ой группе;

ℓ и s - соответственно число групп и интервалов.

Таблица 11.2

Группирование данных об отказах буровых насосов по интервалам бурения

№ интервала i	Границы интервалов наработок до отказа, ч.	№ группы j			Сумма Δn_i	Оценка вероятности попадания в i -й интервал u_i
		1	2	3		
1	0 - 20	28	42	87	157	0,347
2	20 - 40	21	36	70	127	0,280
3	40 - 60	15	29	58	102	0,225
4	60 - 80	7	11	26	44	0,097
5	80 и более	6	12	5	23	0,051
Сумма N_j		77	130	246	453	1,000
Оценка вероятности попадания в j -й интервал u_j		0,170	0,287	0,543	1,000	.

При числе степеней свободы $r = (\ell - 1)(s - 1) = 8$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ по таблицам распределения хи-квадрат находим $\chi^2_{0,95}(8) = 15,507$. Полученное расчетное значение $\chi^2 = 457,193 - 453 = 4,193$ меньше $\chi^2_{0,95}(8)$. Следовательно, данные об отказах деталей гидравлической части буровых насосов не противоречат гипотезе об однородности, и можно принять, что с увеличением глубины бурения скважин в интервале наблюдений вид функции распределения наработок до отказа деталей данной условной подсистемы, не изменяется.

Сводные результаты обработки статистических данных по подсистемам приведены в табл. 11.3. Как видно, эти данные четко указывают на необходимость повышения надежности первой условной подсистемы, как вследствие низкого значения средней

наработки на отказ, так и высокого значения коэффициента вариации. К тому же выявленный экспоненциальный закон распределения наработок подтверждает внезапный характер отказов деталей, отнесенных к этой подсистеме

Таблица 11.3

Результаты обработки статистических данных по подсистемам

№ подсистемы	Средняя наработка на отказ, ч $\bar{T}$	Среднее квадратическое отклонение, ч σ	Коэффициент вариации, V
I	51,46	50,92	0,99
II	687,50	184,65	0,27

Анализ приведенных данных показывает, что примерно в 65% случаев наработка на отказ буровых насосов не превышает 40ч. Около 5% отказов приходится на долю случаев, когда время работы между отказами составляет 80 ч и выше. Средняя наработка на отказ $\bar{T}$ оказалась равной 51,46 ч. при среднем квадратическом отклонении $\sigma = 50,92$ ч. Близость статистических значений $\bar{T}$ и σ позволила выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы. Проведенное выравнивание эмпирической функции распределения наработок на отказ подтвердило согласованность опытных данных с гипотезой экспоненциального распределения. Отсюда интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{1}{\bar{T}} = 0,0194 \text{ 1/ч.}$$

С доверительной вероятностью $1 - \alpha = 0,95$ для средней наработки на отказ был вычислен доверительный интервал

$$46,39 \text{ ч} \leq \bar{T} < 57,70 \text{ ч.}$$

Таким образом установлено, что распределение наработок деталей гидравлической части буровых насосов типа У8-6М подчиняется экспоненциальному закону. Это подтверждает результаты исследования характера и категории отказов деталей и позволяет выделить данную группу деталей в условную подсистему.

При наличии статистических данных и характеристик отказов, аналогичную методику для получения условной подсистемы можно применить к плунжерным нефтепромысловым насосам, к

деталям и сборочным единицам передвижных кислотных установок и др.

Обработка статистических данных по второй условной подсистеме дала следующие результаты (см.табл.11.3). Средняя наработка на отказ $\bar{T} = 687,5$ ч. при среднем квадратическом отклонении $\sigma = 184,65$ ч. Согласованность выдвинутой гипотезы о нормальном распределении с эмпирическими данными также подтвердилась с помощью критерия хи-квадрат.

Как было выше отмечено, при оценке наработки на отказ (до отказа) объекта важно убедиться в стабильности данных путем определения значения коэффициента вариации $V = \sigma/\bar{T}$.

Систематизация накопленных статистических данных позволяет дать некоторые рекомендации по характерным значениям коэффициента вариации V и области их использования. Случаи с $V \leq 0,3 \div 0,35$, полученные по данным эксплуатации, могут быть признаны достаточно хорошими по стабильности наработок объектов исследований. При $V = 0,35 \div 0,5$ полученные в эксплуатации результаты могут быть признаны удовлетворительными. Значения $V > 0,5$ указывают прежде всего на преобладание в потоке внезапных отказов, причинами которых являются: неотработанность отдельных элементов конструкции, нестабильное качество изготовления и сборки объекта, нарушения режимов эксплуатации.

Таким образом, при образовании условных подсистем на основе анализа категорий отказов важным является также оценка коэффициента вариации. Сказанное подтверждается результатами обработки статистических данных по подсистемам, приведенными в табл. 11.3. Как видно, сводные данные четко указывают на необходимость повышения надежности I-ой условной подсистемы, как вследствие низкого значения ее средней наработки, так и высокого значения коэффициента вариации. При этом расчеты показали, что t - критерий Стьюдента для выборок, образующих I и II подсистемы выше его критического значения: $t = 7,662 > t_{кр}$. Это подтверждает обоснованность образования подсистем на основе категорий отказов деталей и сборочных единиц.

Данный метод формирования условных подсистем на основе категорий отказов деталей и сборочных единиц применим, когда требуется уменьшение отношения $\tau_0/\bar{T}$ как за счет $\bar{T}$, так и за счет τ_0 .

11.2.2. Формирование условных подсистем на основе ранжирования ремонтных затрат

Как было выше отмечено (см. раздел 3.2), при законе Вейбулла и нормальном законе распределения времени безотказной работы, важным является также проведение работ по снижению времени восстановления системы.

Известно, что при отказах оборудования в условиях эксплуатации затраты на его восстановление значительно различаются. В большинстве случаев трудоемкости их устранения намного ниже трудоемкости капитального ремонта. Однако в ряде случаев, из-за неотработанности конструкции и специфических, сложных условий работы оборудования, отмечаются превышающие трудоемкость капитального ремонта затраты на отдельные неплановые ремонты оборудования в эксплуатации.

Если известен уровень затрат на капитальный ремонт, то отношение затрат на восстановление работоспособности при любом отказе Z_i к установленным затратам на капитальный ремонт $Z_{кр}$ является важным критерием для оценки уровня этих затрат. В работе [50] это отношение названо рангом ремонтных затрат.

Исходя из этого отношения, можно производить формирование условных подсистем, приняв за критерий, определяющий состав первой условной подсистемы, затраты на внеплановые ремонты, превышающие установленный уровень ранга ремонтных затрат.

Известно, что по достижении предельного состояния большинство узлов и агрегатов систем подвергается капитальному ремонту. В качестве критерия предельного состояния можно принять минимальные ремонтные оперативные затраты при агрегатно-узловой технологии ремонта, без учета затрат на внутризаводскую технологию, связанную с восстановлением деталей.

Таким образом, минимальная оперативная продолжительность (трудоемкость) восстановления работоспособности оборудования определится

$$Z_{кр} = Z_{подг} + Z_{разб.} + Z_{д.к.} + Z_{сб.} + Z_{закл.}, \quad (11.7)$$

где $Z_{кр}$ - оперативная продолжительность (трудоемкость) капитального ремонта, чел.-ч;

$Z_{подг}$ - то же при подготовке оборудования к капитальному ремонту (очистка, мойка и т.д.), чел.-ч;

$Z_{\text{разб}}$; $Z_{\text{сб}}$ - то же соответственно при разборке и сборке, чел.- ч;

$Z_{\text{д.к.}}$ - то же при дефектовке и комплектации, чел.- ч;

$Z_{\text{закл}}$ - то же при заключительных операциях (регулировка, испытание и др.), чел.-ч.

При модернизации оборудования составляющие выражения (11.7) принимаются по данным эксплуатации и ремонтных предприятий. На стадии же проектирования предварительно каждая из составляющих выражения вычисляется по справочным данным (например, [50]), как сумма продолжительностей (трудоемкостей) технологических переходов в составе слесарных операций, связанных с заменой отказавшей детали или агрегатно-узловым ремонтом рассматриваемой сборочной единицы.

$$Z_i = Z'_{\text{подг.}} + Z'_{\text{разб}} + Z'_{\text{д.к.}} + Z'_{\text{сб}} + Z'_{\text{закл.}}, \quad (11.8)$$

где Z_i - оперативная продолжительность (трудоемкость) замены i -ой детали (сборочной единицы) или агрегатно-узлового ремонта, ч;

$Z'_{\text{подг.}}$ - то же при подготовительных работах к ремонту узла (обеспечение доступа к отказавшему узлу), ч;

$Z'_{\text{разб}}$; $Z'_{\text{сб}}$ - то же соответственно при разборке и сборке узла, ч;

$Z'_{\text{д.к.}}$ - то же при дефектовке и комплектации деталей, ч;

$Z'_{\text{закл}}$ - то же при регулировке узла после сборки, испытании и др., ч.

Отношение оперативной продолжительности (трудоемкости) замены детали или ремонта (в том числе агрегатно-узлового) Z_i к затратам на капитальный ремонт оборудования $Z_{\text{кр}}$, принимается [50] как ранг $R_i = Z_i / Z_{\text{кр}}$ ремонтных затрат на восстановление работоспособности сборочной единицы по отношению к затратам, принятым за критерий предельного состояния. Далее составляется упорядоченный ряд рангов ремонтных затрат в порядке убывания их значений, с общим числом членов ряда, равным числу рассматриваемых узлов n в объекте.

$$R_1 \geq R_2 \geq \dots \geq 1 \geq R_i \geq R_{i+1} \geq \dots \geq \alpha \geq R_j \geq R_{j+1} \geq \dots \geq R_n, \quad (11.9)$$

где $\alpha = Z_{\text{тр}} / Z_{\text{кр}}$;

$Z_{\text{тр}}$ - минимальные оперативные затраты на текущий ремонт объекта.

Порядок формирования условных подсистем при данной методике основывается на разбивке результатов ранжирования на четыре группы:

$$1) R_i \geq 1; \quad 2) 1 > R_i \geq \alpha; \quad 3) \sum_{i=\text{мин}}^{i=\text{макс}} R_i > 1; \quad 4) 1 > (\sum R_i) \geq \alpha,$$

которые далее, при составлении схемы, соединяются, представляя каждую из них в схеме одним элементом. То есть, исходная информация сводится к структурной схеме объекта, расчеты по которой не позволяют объективно повышать надежность отдельно взятой сборочной единицы на этапе модернизации или проектирования.

Полученные группы рангов ремонтных затрат служат основой для разбивки системы на условные подсистемы, исходя из следующих предпосылок.

Как было отмечено, для разных групп оборудования с повторными демонтажами-монтажами периоды циклов оборачиваемости различаются. Некоторые агрегаты имеют технологические простои, которые можно рассматривать как резерв времени для технического обслуживания (ТО) и устранения повреждений и отказов. Определенные работы по ТО и ремонту проводятся также при периодически производимых монтажных работах на точках эксплуатации. Поэтому доминирующим фактором последствий отказов оборудования в этих случаях являются затраты на восстановление работоспособности.

В то же время для отдельных видов оборудования, эксплуатирующихся в жестком режиме, плановые ремонты в период эксплуатации не предусматриваются, и поэтому отказы их часто приводят к значительным убыткам в эксплуатации из-за потерь от вынужденных простоев на восстановление, что является для данного случая доминирующим фактором.

Таким образом, выявляются два основных направления для анализа и оценки надежности на стадии проектирования, исходя из доминирующих факторов последствий отказов.

1. Когда ремонтные работы непосредственно в эксплуатации на объекте не предусматриваются, а необходимое техническое обслуживание (ТО) планируется на период технологических простоев. В этом случае для оценки надежности необходим анализ убытков от вынужденных простоев в эксплуатации, из-за необходимости ликвидации последствий внезапных отказов, и доминирующим фактором являются минимальные оперативные затраты на неплановый (чаще

всего агрегатно-узловой) ремонт рассматриваемого оборудования (или отдельного агрегата).

2. Когда наряду с ТО в период эксплуатации допускаются и отдельные ремонтные работы. В этом случае для оценки надежности необходим анализ затрат на восстановление работоспособности, и доминирующим фактором является минимальная оперативная трудоемкость ремонта рассматриваемого оборудования или отдельного агрегата.

Исходя из этого, при первом направлении, когда ремонтные работы в период эксплуатации не предусматриваются, в качестве условной подсистемы, подлежащей поэтапному повышению безотказности и ремонтпригодности, могут быть приняты первые две группы, если во второй группе ($1 > R_i \geq \alpha$) ранг R_i достаточно близок к единице, либо же только первая группа с рангами $R_i \geq 1$. То есть в первой условной подсистеме рекомендуется учитывать в первую очередь отказы, устранение которых за счет неплановых ремонтов требует значительного времени.

Если же ремонтные работы в период эксплуатации предусматриваются (второе направление), то для успешного и своевременного выполнения плановых ремонтов в подлежащую исследованию условную подсистему могут выделяться отказы, учитываемые в третьей и четвертой группе рангов, когда ставится задача повышения прежде всего безотказности, и соответственно отказы первой и второй групп рангов, когда в основном ставится задача повышения ремонтпригодности.

Рассмотрим порядок формирования подсистем на примере ранжирования ремонтных затрат по узлам и агрегатам подъемной установки УПТ-32, по которой накоплен значительный статистический материал. На основе этих данных в табл. 11.4 приведены средние наработки на отказ, время восстановления, количество отказов и процентное их соотношение по основным узлам и агрегатам подъемных установок УПТ-32 [16].

По данным, приведенным в табл. 11.4, следует отметить следующее. Одним из основных сборочных единиц трансмиссии, определяющих надежность подъемных установок УПТ-32, является барабанный вал основной лебедки, внутри тормозного шкива которого установлена однодисковая фрикционная муфта. Опыт эксплуатации подъемных установок и анализ статистической информации об отказах фрикционной муфты показывают, что наиболее характерными отказами для указанного узла являются: потеря герметичности

Сведения об отказах подъемных установок УПТ-32

Наименование основных узлов и агрегатов	Количество отказов	Средняя наработка на отказ, $\bar{T}$, ч.	Среднее время восстановления, $\bar{\tau}_в$, ч	Средние оперативные трудоемкости, чел.-ч		$Z_{тр} / Z_{кр}$	Группы рангов
				При текущем ремонте, $Z_{тр}$	При капитальном ремонте, $Z_{кр}$		
Основная лебедка	25	944	8,8	73	69	1,058	I
Талевая система	5	212	2,5	28	33	0,848	II
Система телескопической вышки	15	619	10,7	41	92	0,446	III
Коробка передач	10	450	25,1	93	61	1,525	I
Коробка отбора мощности	3	678	14,3	84	56	1,500	I
Тормозная система (без учета тормозной ленты)	1	4512	8,0	62	73	0,849	II
Фрикционная муфта	1	2093	41,0	102	82	1,244	I
Конический редуктор	1	202	2,0	20	41	0,488	III
Пневмосистема	4	275	4,5	11	42	0,262	IV
Гидросистема	11	404	4,8	48	96	0,500	III
Электрооборудование	21	836	2,4	19	81	0,235	IV
Крмпрессор	10	477	5,5	16	46	0,348	IV
Итого:	107	-	-	597	772	$\alpha = 0,773$	-

уплотняющей манжеты узла вертлюжка, нарушение герметичности пневмопроводов (пропуск воздуха, обрыв диафрагмы и износ ретинаксовых вкладышей).

Следует также отметить интенсивное изнашивание накладок тормозной ленты и тормозного шкива; первые подвергаются замене при плановом техническом обслуживании, а второй - при плановом текущем ремонте, исходя из его состояния. Низкий ресурс имеют также цилиндрические и конические шестерни коробки передач.

Высокие требования предъявляются к гидравлическому тормозу, предназначенному для автоматического регулирования скорости подъема и опускания вышки, в частности для обеспечения максимальной скорости в начале подъема (опускания) и замедления скорости движения вышки до безопасной в конце подъема (опускания) с целью плавной посадки на заднюю опору. Потеря работоспособности кольца штуцера, а также засорение золотника являются характерными причинами отказов данного узла [21].

Гидросистема подъемных установок, предназначенная для приведения в действие таких вспомогательных механизмов, как гидравлический домкрат, гидроцилиндры выдвижения верхней секции вышки, автоматов для свинчивания и развинчивания насосно-компрессорных труб и др., также является одним из основных систем, определяющих надежность подъемной установки. Характерными для данной системы являются отказы: гидродомкрата - из-за течи масла через манжеты и резиновые кольца; гидронасоса - в связи с деформированием муфты и потерей упругих свойств пружин; засорение узла золотника механическими примесями.

Как видно из приведенных в табл. 11.4 статистических данных, средняя наработка между отказами основных сборочных единиц подъемных установок УПТ-32 достаточно высокая, в то же время среднее время восстановления в отдельных случаях значительно, особенно некоторых систем установок УПТ-32: фрикционной муфты, коробки перемены передач и коробки отбора мощности [16].

В целях повышения надежности подъемной установки УПТ-32 АзИНМАШем были реализованы ряд инженерно-технических мероприятий [16,21]: увеличена долговечность тормозной системы за счет замены чугунного тормозного шкива на стальной, введена регулировка конической передачи трансмиссионного вала и др.

Обработка статистических данных показала, что распределения наработок на отказ и времени восстановления установок УПТ-32 (без учета отказов транспортной базы) подчиняются экспо-

ненциальному закону с статистическими значениями параметров: $T^* = 1163$ ч, $\sigma^* = 1069$ ч, $V = 0,919$; $\tau_b^* = 9,26$ ч.

Близость функции плотности распределения времени безотказной работы к экспоненциальному распределению объясняется не столько наличием в установке недостаточно отработанных узлов и деталей гидравлической и пневматической систем, электрооборудования, а также отдельных деталей (что указывает на возможность внезапных отказов), но и тем, что время безотказной работы сложной системы может подчиняться экспоненциальному закону и в тех случаях, когда этому закону не подчиняются подсистемы, но отказавшие элементы восстанавливаются в процессе работы системы. Последнее также характерно для передвижных подъемных установок УПТ-32 [16].

В табл. 11.4 приведены также средние оперативные затраты на текущие ремонты ($Z_{тр}$) и капитальный ремонт ($Z_{кр}$) основных агрегатов и систем подъемной установки УПТ-32.

Ранжирование ремонтных затрат производим в следующей последовательности.

1. Определяем отношение нормируемых затрат на текущий и капитальный ремонты установки

$$\alpha = Z_{тр} / Z_{кр} = 0,773.$$

2. Определяем ранги ремонтных затрат агрегатов и систем установки (см. табл. 11.4).

$$R_i = Z_{тр i} / Z_{кр i}.$$

3. Составляем упорядоченный ряд рангов ремонтных затрат узлов в порядке убывания их значений по агрегатам и узлам установки

$$\begin{aligned} & \overbrace{(R_1 = 1,525) \geq (R_2 = 1,500) \geq (R_3 = 1,244) \geq (R_4 = 1,058) \geq 1}^{R_i \geq 1} \geq \\ & \quad \overbrace{\geq (R_5 = 0,849) \geq (R_6 = 0,848) \geq}^{1 > R_i \geq \alpha} \geq \\ & \quad \overbrace{\geq (R_7 = 0,500) \geq (R_8 = 0,488) \geq (R_9 = 0,446) \geq}^{\sum_{i=10}^{12} R_i \geq 1} \geq \\ & \quad \overbrace{\geq (R_{10} = 0,348) \geq (R_{11} = 0,262) \geq (R_{12} = 0,235)}^{1 > (\sum_{i=1}^{12} R_i) \geq \alpha} \end{aligned}$$

4. По рангам ремонтных затрат с учетом $\alpha = 0,773$ определяем состав групп агрегатов и узлов.

В первую группу ($R_i \geq 1$) входят: основная лебедка, коробка перемены передач, коробка отбора мощности и фрикционная муфта.

Во вторую группу ($1 > R_i \geq \alpha$) - талевая система и тормозная система.

В третью группу ($\sum_{i=\min} R_i \geq 1$) входят система телескопической вышки, конический редуктор, гидросистема.

В четвертую группу ($1 > (\sum R_i) \geq \alpha$) - пневмосистема, электрооборудование и компрессор.

Так как ремонтные работы непосредственно в период эксплуатации подъемных установок не предусматриваются, то в подлежащую исследованию подсистему целесообразно включить первые две группы агрегатов. Анализ приведенных в табл. 11.4 данных показывает, что на агрегаты, вошедшие в первую группу, приходится свыше 33% всех отказов и значительная часть общего времени восстановления, что подтверждает эффективность разработанного метода разбивки системы на условные подсистемы ранжированием ремонтных затрат.

Таким образом, данная методика формирования условных подсистем позволяет гибко подходить к поэтапному повышению надежности оборудования, решая задачу повышения безотказности и ремонтпригодности последовательно на различных этапах обработки конструкции отдельных сборочных единиц или агрегатов, их модернизации и проектирования.

11.3. Оценка технико-экономической эффективности повышения надежности оборудования

Технико-экономический анализ и расчет экономической эффективности результатов реализации научно-обоснованных рекомендаций по повышению надежности оборудования, как правило, основываются на достигнутом фактическом повышении ресурса деталей и сборочных единиц, а также уменьшении затрат на восстановление работоспособности.

В случае же оценки эффективности качества ремонта машин и агрегатов более важным является также сравнительная оценка

затрат на устранение каждого из отказов и убытков, связанных с простоями оборудования во время ремонта из-за данного отказа.

Указанные составляющие зависят от назначения и характера использования оборудования. В более общем случае, когда величина эффекта от использования оборудования зависит от длительности его работы и не зависит от выполнения поставленной задачи, оценка затрат связана лишь с восстанавливаемостью сборочной единицы.

Если отказ невосстанавливаемой (неремонтируемой) сборочной единицы приводит к необходимости его замены, то при этом общие затраты от отказов $\beta'_{\text{нв}}$ определяются затратами на замену отказавшей сборочной единицы (C_3) и убытками, обусловленными непосредственно самим фактом отказа ($C_{\text{отк}}$).

$$\beta'_{\text{нв}} = C_3 + C_{\text{отк}} = \frac{\sum_{i=1}^{d(t)} C_{3i} + \sum_{i=1}^{d(t)} C_{\text{отк}i}}{d(t)} \text{ манат/отказ,} \quad (11.10)$$

где C_3 - включает затраты на разборку и снятие отказавшей сборочной единицы (детали), стоимость новой сборочной единицы и затраты на ее установку, манат;

$C_{\text{отк}}$ - включает убытки от поломок и аварий, затраты на их устранение, манат;

$C_{3i}; C_{\text{отк}i}$ - фактические значения составляющих убытка при i -ом отказе, манат;

t - фиксированный отрезок времени, ч;

$d(t)$ - количество отказов за время t .

Если же отказ восстанавливаемой (ремонтируемой) сборочной единицы приводит к необходимости ее ремонта и вынужденному простою, то общие затраты от отказов β'_* определяются затратами на ремонт (C_p), убытками, обусловленными непосредственно фактом отказа сборочной единицы ($C_{\text{отк}}$) и вынужденным простоем ($C_{\text{вп}}$),

$$\beta'_* = C_p + C_{\text{отк}} = \frac{\sum_{i=1}^{d(t)} C_{pi} + \sum_{i=1}^{d(t)} C_{\text{отк}i}}{d(t)} \text{ манат/отказ;} \quad (11.11)$$

$$C_{\text{вп}} = \frac{\sum_{i=1}^{d(t)} \varepsilon_i}{t_n} \text{ манат/час,} \quad (11.12)$$

где C_p - включает стоимость заменяемых при ремонте деталей и заработную плату ремонтных рабочих, манат;

ε - включает заработную плату основных рабочих за время простоя и затраты по производству невыработанной в результате простоя продукции, манат;

C_{pi} - фактическое значение составляющего убытка при i -ом отказе, манат;

t_n - время простоя в ремонте, ч.

В опубликованной литературе приводятся также зависимости для оценки затрат на устранение отказов, которые приводят к невыполнению поставленных задач и поэтому - к необходимости замены устройства путем агрегатно-узлового ремонта.

Если отказ невосстанавливаемой (неремонтируемой) сборочной единицы (детали) оборудования приводит к невыполнению задачи и необходимости замены устройства, то в этом случае экономический убыток от отказа состоит из затрат на замену отказавшей сборочной единицы или агрегата (C_3), из убытков, обусловленных непосредственно фактом отказа ($C_{\text{отк}}$) и из (частичных или полностью) затрат, осуществленных на выполнение задачи до момента отказа ($C_{\text{ос}}$).

$$\beta''_{\text{нв}} = C_3 + C_{\text{отк}} + C_{\text{ос}} = \frac{\sum_{i=1}^{d(t)} C_{3i} + \sum_{i=1}^{d(t)} C_{\text{отк}i} + \sum_{i=1}^{d(t)} C_{\text{ос}i}}{d(t)} \text{ манат/отказ,} \quad (11.13)$$

где $C_{\text{ос}}$ - включает затраты на материалы, топливо, энергию, заработную плату и др., уже осуществленные на выполнение задачи до момента отказа оборудования;

$C_{\text{ос}i}$ - фактическое значение составляющего убытка при i -ом отказе.

Если же отказ восстанавливаемой сборочной единицы оборудования приводит к невыполнению задачи и необходимости ремонта, то в этом случае убыток от отказа состоит не только из затрат на ремонт C_p и убытка, обусловленного непосредственно фактом отка-

за ($C_{отк}$), но и затрат, осуществленных на выполнение задачи до момента отказа ($C_{ос}$)

$$\beta''_в = C_p + C_{отк} + C_{ос} = \frac{\sum_{i=1}^{d(t)} C_{pi} + \sum_{i=1}^{d(t)} C_{отки} + \sum_{i=1}^{d(t)} C_{осi}}{d(t)} \text{ манат/отказ; (11.14)}$$

Приведенная методика охватывает условия функционирования большинства разновидностей нефтепромыслового оборудования. В то же время при оценке технико-экономической эффективности повышения надежности буровых и нефтепромысловых установок (в частности передвижных подъемных установок) требуются определенные уточнения. Это связано прежде всего, с производимыми спуско-подъемами инструментов, бурильных и насосно-компрессорных труб (НКТ), а также насосных штанг при различающихся глубинах скважин. В свою очередь последнее требует учета в расчетах параметров колонн труб и штанг и скорости их подъема (спуска).

11.3.1. Оценка технико-экономических показателей передвижных подъемных установок

Технико-экономический анализ и расчет экономической эффективности передвижных подъемных установок от повышения надежности, в результате реализации разработанных рекомендаций по повышению наработок на отказ и снижению времени восстановления подсистем, основывается на достигнутом фактическом повышении ресурса до капитального ремонта установок.

При этом расчет экономической эффективности проводится исходя из определения количества скважин, которые возможно дополнительно отремонтировать за счет увеличения ресурса до капитального ремонта и за весь срок службы установки [29].

Показатели надежности подъемной установки в целом и ее подсистем тесно связаны с режимами работы установки в реальной эксплуатации. Важно при этом учитывать особенности выполнения технологического цикла процесса ремонтно-восстановительных работ, а также соотношения транспортного и стационарного режимов эксплуатации подъемной установки.

Для определения дополнительного количества ремонтируемых скважин прежде всего необходимо установить ресурс (в мото-

часах) подъемной установки, который может быть использован на последовательно выполняемые спуско-подъемные операции.

Предложена формула для определения возможного количества дополнительных отремонтированных скважин за счет повышенного (ΔR) ресурса [29]. Отметим, что данная методика распространяется на все классы подъемных установок согласно параметрическому ряду грузоподъемностей.

Для класса грузоподъемности установок 320 кН: АЗИН-МАШ-37А, УПТ-32, ЛПТ-8 количество скважин, отремонтированных за счет дополнительного ΔR ресурса, определяется следующим образом:

$$\Delta N = \frac{\Delta R}{2 \left\{ \sum_{j=1}^r \left[\frac{\bar{L}_{j, \text{НКТ}}}{\bar{v}_{j, \text{НКТ}}} + \frac{\bar{L}_{j, \text{ШГ}}}{\bar{v}_{j, \text{ШГ}}} + K(T_{j, \text{НКТ}}^{(\text{ср})} + T_{j, \text{ШГ}}^{(\text{ср})}) \right] + T_{\text{ук НКТ}} + T_{\text{ук ШГ}} \right\}}, \quad (11.15)$$

где r - количество штанговых муфт, подвергающихся свинчиванию-развинчиванию соответствующими подъемными установками;

ΔR - дополнительный ресурс, полученный в результате повышения надежности;

$\bar{L}_j$ - средняя длина колонны труб или штанг;

$\bar{v}_j$ - средняя скорость подъема труб или штанг соответствующими подъемными установками при подъеме j -й НКТ (штанги);

$T_j^{(\text{ср})}$ - время, затраченное на свинчивание или развинчивание j -й НКТ или штанги;

K - количество муфт на колонне труб.

Формула (11.15) позволяет определить количество скважин которые могут быть отремонтированы одной подъемной установкой определенного типа за счет дополнительного ресурса до капитального ремонта установки, что позволяет рассчитать экономическую эффективность от повышения надежности установки.

Экономический эффект от повышения надежности нефтепромысловых передвижных подъемных установок может быть получен от реализации следующих основных источников экономии:

- от повышения производительности установок (количества ремонтов, выполняемых за год) за счет реализации инженерно-технических мероприятий, в результате которых повышен ресурс до капитального ремонта установки;

- от снижения расходов на проведение ремонтно-восстановительных работ по скважинам, в связи с повышением средней наработки на отказ и уменьшением среднего времени восстановления, и соответственно, уменьшением количества отказов, приводящих к сокращению продолжительности ремонтов подъемных установок.

Реализация мероприятий конструкторского и технологического характера по подъемным установкам для ремонта скважин позволяет повысить ресурс их до капитального ремонта, а также значения наработок на отказ.

С учетом этого расчет годового экономического эффекта от производства и эксплуатации установок с повышенной надежностью производится по формуле:

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{U_1 - U_2 - E_n(K_2 - K_1)}{P_2 + E_n} - 3_2 \right] A_2. \quad (11.16)$$

Если мероприятия по повышению надежности установок не связаны с увеличением срока службы до списания и не имеют место сопутствующие капитальные вложения потребителя, вызванные использованием установок с повышенной надежностью, формула (11.16) примет вид:

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{B_2}{B_1} + \frac{U_1 - U_2}{P_2 + E_n} - 3_2 \right] A_2,$$

где 3_1 и 3_2 - приведенные затраты на одну установку соответственно до и после повышения надежности, манат;

P_1 и P_2 - доли амортизационных отчислений соответственно базовой установки и установки с повышенной надежностью;

B_1 и B_2 - годовые объемы работ (фонды времени), производимые при использовании соответственно базовой установки и установки с повышенной надежностью в натуральных единицах;

B_1/B_2 - коэффициент роста производительности установки с повышенной надежностью по сравнению с базовой;

E_n - нормативный коэффициент экономической эффективности ($E_n = 0,15$);

I_1 и I_2 - годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании соответственно базовой установки и установки с повышенной надежностью, манат;

K_1 и K_2 - удельные капитальные вложения соответственно до и после повышения надежности, манат;

A_2 - годовой объем производства установок с повышенной надежностью, шт.;

$(P_1 + E_n)/(P_2 + E_n)$ - коэффициент, учитывающий изменение срока службы подъемной установки с повышенной надежностью, по сравнению с базовой.

В общем виде приведенные затраты на одну установку определяются:

$$Z = C + E_n K,$$

где K - удельные капитальные вложения в производительные фонды, манат;

C - себестоимость единицы установки, манат.

Следовательно,

$$Z_1 = C_1 + E_n K_1;$$

$$Z_2 = C_2 + E_n K_2,$$

где C_1 и C_2 - себестоимость одной установки соответственно до и после повышения надежности.

Расчет производственных затрат. Себестоимости C_1 и C_2 , приведенные затраты Z_1 и Z_2 , удельные капитальные вложения K_1 и K_2 , производственные фонды по установкам определяются из фондоемкости на 1 манат себестоимости подъемных установок до и после повышения надежности, принятые по данным завода-изготовителя.

Коэффициент роста производительности труда при производстве техники с повышенными показателями надежности по сравнению с базовым устанавливается, как отношение годового фонда времени подъемных установок до и после повышения показателей надежности. Годовой фонд времени работы до повышения показателей надежности (B_1) по указанным выше подъемным установкам определяется из следующей зависимости:

$$B_1 = T_k K_{ис} K_{см} T_{см}, \quad (11.17)$$

где T_k - календарное количество дней в году;

$K_{ис} = 0,65$ - коэффициент использования календарного времени установок;

$K_{см}$ - коэффициент сменности; например по ЛПТ-8; $K_{см} = 1,6$;
 средний коэффициент сменности применительно к установкам АЗИНМАШ-37А и УПТ-32 принимается $K_{см} = 2,2$.

Годовой фонд времени работы B_2 подъемных установок после реализации мероприятий по повышению показателей надежности определяется из выражения:

$$B_2 = B_1 + \Delta t ,$$

где Δt - сокращение времени простоя установок при производстве ремонтно-восстановительных работ, приходящееся на год эксплуатации.

Сокращение времени простоя подъемных установок при производстве ремонтно-восстановительных работ, после реализации мероприятий по повышению показателей надежности; определяется исходя из разницы количества отказов и продолжительности простоев, необходимых для устранения их до и после внедрения мероприятий.

Сокращение времени простоя подъемных установок определяется по следующей формуле:

$$\Delta t = \Pi_1 t_{мин} T_{см} K_{см} + \Pi_2 \frac{T_{пр}}{T_{ссл}} T_{см} K_{см} , \quad (11.18)$$

где Π_1 - сокращение числа отказов после повышения наработки на отказ по типам установок;

$t_{мин}$ - минимальное время простоя установки при одном отказе, сутки;

$T_{см}$ - продолжительность рабочей смены, ч;

Π_2 - число сокращенных текущих ремонтов за срок службы соответственно по типам установок;

$T_{ссл}$ - срок службы установок, лет ($T_{ссл} = 9$ лет);

$T_{пр}$ - продолжительность простоев установок в одном текущем ремонте; для установок АЗИНМАШ-37А $T_{пр} = 22$ ч., для установок УПТ-32 и ЛПТ-8 $T_{пр} = 14$ ч.

Расчет изменения годовых эксплуатационных издержек потребителя после повышения показателей надежности ($I_1 - I_2$) производится из расчета экономии по эксплуатационным издержкам, которая формируется за счет разницы в затратах на текущие ремонты скважин и ремонты, связанные с отказами подъемных установок.

12. Современные проблемы обеспечения конкурентоспособности, качества и надежности нефтепромыслового оборудования

В условиях рыночной экономики проблема высокого качества и надежности оборудования неразрывно связана с обеспечением его конкурентоспособности.

В работах одного из классиков конкурентоспособности М.Портера высказано чрезвычайно важное суждение о том, что конкурентоспособная продукция должна создаваться в условиях конкурентоспособных предприятий, которые, в свою очередь, формируют конкурентоспособную отрасль и, наконец, конкурентоспособную экономику страну.

Под конкурентоспособностью предприятия подразумевается [22] возможность проектировать, изготавливать и реализовывать продукцию на рынке, оставаясь длительное время функционирующим при наличии потенциальных конкурентов. Вместе с тем, основными составляющими конкурентоспособности, сохраняемыми для большинства конкретных условий рынка, являются следующие факторы: качество оборудования, цена оборудования, затраты на эксплуатацию оборудования, качество сервисного обслуживания.

То есть «конкурентоспособность» является более емким и весьма динамичным понятием, чем качество продукции. В подтверждение этому в табл. 12.1, на основе работы В.Я. Кершенбаума и М.П. Поликарпова, приводится перечень внутренних факторов конкурентного преимущества продукции и направленность их влияния на конкурентоспособность.

Основными международными стандартами по обеспечению качества продукции являются стандарты серии ISO 9000. Концепция, заложенная в этих стандартах, предполагает, что основной задачей каждого предприятия является обеспечение высокого качества производимой продукции и предоставляемых услуг.

В соответствии со стандартом (ИСО 8402): «Качество - это совокупность свойств и характеристик продукции или услуги, которые придают им способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности».

Таким образом, бесспорно, что качество продукции и совокупность свойств и характеристик изделия, к которым относится и надежность, является важнейшим показателем его конкурентоспособности.

Таблица 12.1

Перечень внутренних факторов конкурентного преимущества продукции и направленность их влияния на конкурентоспособность

Внутренние факторы конкурентного преимущества продукции, определяемые системой	Направленность влияния фактора на конкурентоспособность продукции
1. Патентоспособность (новизна) конструкции (структуры, состава) продукции	С повышением патентоспособности продукции повышается ее конкурентоспособность.
2. Рациональность организационной и производственной структур системы	Структура системы должна отвечать принципам рационализации производственных структур и процессов. Тогда она будет способствовать повышению конкурентоспособности.
3. Конкурентоспособность персонала системы	Повышение конкурентоспособности персонала повышает конкурентоспособность продукции.
4. Прогрессивность информационных технологических процессов и оборудования	С увеличением удельного веса прогрессивных технологий повышается конкурентоспособность продукции.
5. Научный уровень системы управления (менеджмента)	С увеличением количества применяемых научных подходов, принципов и современных методов управления повышается конкурентоспособность продукции.
6. Обоснованность миссии системы	Миссия системы должна быть ориентирована на достижение конкурентоспособности системы и применяемой в ней продукции.

Современное машиностроительное изделие, его потребительские достоинства формируются последовательно на этапах исследования, проектирования, производства и эксплуатации. Ошибки, допущенные на любом этапе, приводят к снижению уровня эксплуатационных показателей, а следовательно и качества. Поэтому в настоящее время, когда проблема конкурентоспособности рассматривается как общегосударственная и межотраслевая, необходим принципиально новый метод формирования качества продукции.

На этапе исследования качество будущего изделия предопределяется степенью достоверности и полнотой научных выводов, устанавливающих определяющие условия и направления проектно-конструкторских разработок. При проектировании качество обуславливается техническим уровнем проектно-конструкторской документации, степенью учета прогнозируемых показателей качества в проекте. На стадии производства - качеством сырья, материалов, полуфабрикатов, качеством изготовления деталей и сборочных единиц, организацией и состоянием технологических процессов. При эксплуатации качество изделия определяется его способностью удовлетворять функциональным требованиям надежности: безотказности, долговечности, ремонтпригодности, монтажепригодности и сохраняемости.

По мере насыщения рынка теми или иными видами продукции, те из них, которые не полностью отвечают требованиям, предъявляемым к данным изделиям, в короткий срок теряют своего потребителя. Поэтому без постоянного повышения качества выпускаемой продукции невозможно поддержание эффективной экономической деятельности предприятия.

Ведущую роль в определении требований, предъявляемых к качеству продукции, играет маркетинг. В результате маркетинговых исследований определяется рыночный спрос к продукции, устанавливаются требования, предъявляемые потребителем к данной продукции, которые и служат основой для выполнения последующих работ по проектированию и разработке технологических процессов.

Обеспечение качества продукции в процесса производства достигается в результате систематических управляющих воздействий на ход производственного процесса, на технологические процессы и операции, поставляемые комплектующие изделия и материалы, на производственную среду и персонал.

Другим важнейшим элементом современного механизма управления качеством продукции является сертификация, которая

является объективным доказательством соответствия продукции, предъявляемым к ней требованиям.

Идея сертификации, разработанная для гарантии качества продукции или услуг с точки зрения потребителя, представляет собой проверку (аудит) соответствия характеристик продукции, а также процессов и систем, определенным стандартам качества (например, международным стандартам ISO-9001 или разработанным на их основе национальным стандартам различных стран).

В системе сертификации предусмотрена проверка на соответствие нормативным документам показателей, характеризующих производство: наличие оборудования, оснастки и проборов для качественного выполнения предусмотренных работ; наличие и существующий порядок совершенствования технической документации; квалификация руководителей и исполнителей; соблюдение условий договоров и обеспечение гарантийных обязательств; обеспечение прав потребителей при обнаружении недостатков в исполнении заказа и др. [3].

Сертификация по международным системам качества является авторитетной как для потребителей оборудования, так и для производителей. Зачастую наличие сертификатов является обязательным и входит в систему оценок коммерческих предложений.

К функциональным показателям качества в первую очередь относят показатели надежности, так как недостаточная надежность оборудования уменьшает его производительность, увеличивает опасность возникновения аварий, травмирования обслуживающего персонала и возможность человеческих жертв; требует больших расходов на многократное восстановление отказавших машин и механизмов, приводит к значительным убыткам из-за простоев в эксплуатации. При этом, из-за непрерывного усложнения применяемого оборудования, компьютеризации и роботизации технологических процессов, перехода на гибкие автоматизированные системы, актуальность проблемы повышения надежности не только не уменьшается, а наоборот, многократно возрастает. В связи с этим возрастает значение исследования и устранения причин преждевременных отказов оборудования, применение эффективной системы технического обслуживания и ремонта с целью поддержания в эксплуатации высокого уровня безотказности [2, 23].

Таким образом, проблема качества, обусловленная процессами создания и использования изделия, сложна и многогранна, а во взаимосвязи и взаимообусловленности всех влияющих факторов выявляется необходимость их регулирования (управления). Приме-

нительно к проблеме качества сущность задачи управления в конечном счете сводится к созданию продукции с такими свойствами, которые бы в максимально возможной степени удовлетворяли потребности при минимальных затратах средств и труда.

Содержание процесса управления сводится к проведению следующих последовательных и взаимосвязанных действий:

- изучению управляемого объекта (природы качества данного изделия, механизма его формирования и средств воздействия);
- выработке оптимальной стратегии управления (разработке эффективных методов обеспечения, повышения и сохранения качества, планирования и прогнозирования качества);
- реализации выработанной стратегии управления качеством.

Совокупность отмеченных упорядоченных и целенаправленных действий над качеством, как объектом управления, составляет систему управления качеством, которая является составной частью общей системы управления машиностроением республики.

Именно системный подход позволяет рационально реализовать различные методы управления: экономические, технические, социальные, организационные и другие. Каждый из них характеризуется определенным способом и средствами воздействия на качество, в том или ином объеме используется на различных уровнях и этапах управления и формирования качества.

Современное расширение рынка сбыта влияет не только на качество продукции и услуг, но и на подходы к руководству качеством. Появление концепции "всеобщее управление качеством" (Total Quality Management - TQM), впервые высказанной западными экономистами, представляет собой интегрированные усилия на всех уровнях компаний и фирм по непрерывному совершенствованию действий всего коллектива, направленных на улучшение их деятельности, в первую очередь в части повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Программы по TQM включают [1]:

1. Информационное обеспечение и развитие персонала путем более широкого информирования всех сотрудников относительно выпускаемой продукции, рынков, развития технологии и т.п.

2. Обучение сотрудников и введение системы предложений с целью непрерывного улучшения качества продукции, так как оно во многом зависит от квалификации работников, занятых при ее производстве и испытаниях.

3. Более эффективное обеспечение качества на этапе проектирования, испытаний и производства, от ранних стадий проектирования до выпуска готовой продукции.

4. Создание модели и системы оценки затрат, направленных на повышение качества. Традиционно эта модель включает затраты на профилактику (предотвращение ошибок), затраты на устранение дефектов и затраты на оценку качества. Если продукция не отвечает установленным требованиям, возникают издержки на устранение дефектов как материальные, так и трудовые, что приводит к определенным убыткам.

5. В Европе TQM определяется как культура организации производства, призванная отвечать запросам потребителей на основе непрерывного совершенствования. На востоке (Япония и Корея) TQM отличается научным подходом - более широким применением статистического управления качеством и организацией школ качества. Используемая там философия качества несколько изменяет определение для восточных государств [1].

TQM предполагает широкое использование данных, системную ориентацию и всеобщее управление, возглавляемое высшими руководителями. Эта система всеобщего руководства, при которой политика качества, управление качеством, повышение качества и его обеспечение играют важную роль.

Чем же отличаются европейский и восточный подходы к управлению качеством?

Западные страны (включая б. СССР) внесли более ранний вклад в развитие всеобщего управления качеством.

Первым этапом системного подхода к проблеме повышения качества в б. СССР можно считать разработку и внедрение на предприятиях Саратова системы организации бездефектного изготовления продукции (БИП). На последующих этапах развития систем управления качеством продукции на многих предприятиях были реализованы различные системы: КАНАРСПИ ("качество, надежность, ресурс с первых изделий"), НОРМ ("научная организация работ по повышению моторесурса") и др.

На основе внедрения указанных систем в начале 70-х годов была разработана "комплексная система управления качеством продукции" (КС УКП), - совокупность управляющих органов и объектов управления, взаимодействующих с помощью материально-технических и информационных средств при управлении качеством на уровне предприятия.

Среди последних предложений в российской периодической печати заслуживает внимания процесс по обеспечению надежности техники за весь период ее жизненного цикла. Данный метод в силу специфики отдельных этапов жизненного цикла изделия сопровождается собственной методической и нормативной базой, обеспечивающей поступательное развитие процесса доводки образца до требуемого уровня надежности, основой формирования и использования которой является проведение целевых работ общего или специального планов по обеспечению надежности. Несовершенство этой базы или ее несоблюдение на том или ином этапе ведут к искажению действительной картины надежности, что отражается на проведении доводочных работ на более поздних этапах, на функциональном поведении изделий в последующем его применении по назначению и приводят к значительно большим издержкам, чем отработка этого недостатка ранее, когда он был упущен.

В целом западные страны внесли значительный вклад в развитие управления качеством путем разработки следующих компонентов [1]:

- планы выборок при контроле качества, позволяющие при правильном осуществлении выборки из партии по относительно небольшой части изделий сделать правильные выводы о качестве всей партии;

- контрольные карты, позволяющие оценивать степень изменчивости и разделение результатов проверок на компоненту, связанную с работой оборудования (компонента "натурального шума"), и компоненту, связанную с работой производственного персонала, которая естественно может быть исправлена;

- планирование экспериментов, в свое время представившее собой эволюционное планирование разработки и проведения экспериментальных исследований, приводящие к созданию адаптационной оптимизации;

- концепция TQM, которая, как было выше отмечено, применяется во многих странах, как одно из наиболее важных направлений в области управления качеством.

В восточных странах, прежде всего в Японии, системы управления качеством базировались на принципах обеспечения высокого технического уровня и качества еще на стадиях отработки конструкции и технологии изготовления. Особое внимание во всех системах контроля качества уделялось исключению повторяющихся отказов путем осуществления мероприятий по их устранению.

Большое внимание в Японии придается также вопросам обучения производственного персонала разного ранга: должностных лиц, специалистов по управлению качеством, мастеров по контролю качества и др.

Среди разработанных в восточных странах компонентов необходимо прежде всего отметить следующие [1]:

1. Методы, которые можно эффективно использовать без специальной подготовки для решения подавляющего большинства проблем, возникающих в производстве или обслуживании. К ним относятся и контрольные карты. По данным проф. Исикавы они обеспечивают решение примерно 95% всех проблем, возникающих в производстве.

2. Система "канбан", основными требованиями которой являются "ноль дефектов" и "ноль запасов". Накопление запасов по своей сути позволяет скрывать производственные проблемы и трудности: остановки станков, нарушение ритма производства и т.п. При системе "канбан" каждая заготовка, комплектующая деталь или узел должны иметь минимальное запланированное количество, которое должно все время поддерживаться. Если на типичном американском предприятии производственные запасы обновляются 10-20 раз в год, то на предприятиях, использующих систему "канбан" - 50-100 раз в год. Однако систему "канбан" невозможно реализовать в полной мере без одновременного внедрения комплексной системы управления качеством.

3. Принцип "пока-йок" (poke-yoke) - метод, обеспечивающий невозможность вывода из строя машины за счет неквалифицированного воздействия (часто используется термин "дуракоустойчивость"). Другими словами этот термин означает 100% -ную надежность (отсутствие ошибок) при выполнении работы системой человек - машина.

4. Методы "кайзен" - непрерывного улучшения работы всех служащих в организации, в результате чего происходит пусть небольшое, но ежедневное улучшение выполнения ими своих задач. Однако, ежедневно накапливаясь и превращаясь во множество небольших усовершенствований, они приводят к значительным общим результирующим сбережениям и улучшениям. Так, во время внедрения методов кайзен" на фирме "Toyota" себестоимость продукции уменьшилась на 0,01% в неделю.

5. Методы Тагути, - названные в честь японского экономиста Г.Тагути, предложившего оценивать все производимые изменения в денежном эквиваленте.

6. Семь инструментов управления качеством, позволяющие наряду с принятой системой контроля качества осуществлять эффективное управление производственными процессами. Сюда относятся: диаграммы сродства, схемы взаимных связей, дерево решений, матричные диаграммы, анализ матричных данных, диаграмма планирования оценки процесса и стрелочная диаграмма. Наиболее эффективное их применение отмечается при проектных работах.

7. Структурные функции качества (Quality function deployment - QFD) - метод учета реальных требований потребителей на всех этапах жизненного цикла выпуска продукции или предоставления услуг, начиная от проектирования и кончая техническим обслуживанием продукции у потребителя. Этот метод считается более эффективным, чем исследование рынка, применяемое в США.

8. Улучшение качества в рамках всей компании (Company - wide quality improvement - CWQI) - осуществление управления в компании на основе всеобщего повышения качества, т.е. улучшение всех процессов организации: исследования рынка, проектирования, производства, доставки продукции и технического обслуживания.

На американском континенте также используются различные системы управления качеством, для которых характерно обеспечение качества продукции на всех стадиях создания изделия - от проектирования до обслуживания в эксплуатации, а также наличие централизованной службы управления качеством. Большая часть систем базируется на научно обоснованной организационной структуре управления, методах управления технологическими процессами, техническим контролем, системой информации о качестве продукции, моральным и материальным стимулированием.

Компанией "Клейтон Девандре Хойллинг" (США) разработан метод "анализа характера дефектов и причин, их вызывающих" (potential failure mode and effects analysis - F.M.E.A.). Этот метод предназначен для разработчиков и изготовителей и направлен на обеспечение требований заказчика к надежности основного изделия. Сущность метода заключается в том, что еще на начальных стадиях создания техники проводится анализ и количественно определяются потенциально возможные причины и последствия отказов всех деталей, которые могут отказать в процессе эксплуатации. Исследования по методу F.M.E.A. завершаются выработкой рекомендуемых действий, предусматривающих: изменение конструкции детали или узла, изменение технологического процесса, совершенствование процесса контроля качества.

В результате взаимодействия восточного и западного подходов к управлению качеством образовались новые компоненты [1]:

1. Система "точно в срок" (just - in - time JIT), основанная на японской системе "канбан" и представляющая собой логическую структуру организации потоков материалов, информации, исполнителей и денежных средств для производства деталей и узлов в точно назначенное время и в строго необходимом количестве.

2. Принцип оценки достигаемого уровня (bench - marking) - как попытки ослабить давление конкурентов, используя объединенную оценку достигаемого уровня качества на предприятии. За счет сравнения качества продукции своей организации с аналогичной продукцией конкурентов подобная оценка позволяет оперативно выявить несоответствия качества и наметить пути его улучшения.

3. Разработка концепции щадящего производства (lean production) - представляет собой реакцию систем управления качеством на возникновение и решение экологических проблем. Достаточно отметить, что введены новые стандарты ИСО серии 14000, регламентирующие принципы разработки систем управления качеством с точки зрения защиты окружающей среды.

4. Реконструкция предприятия (re - engineering) - необходимая структурная перестройка в ответ на несоответствие качества выпускаемой продукции требованиям потребителей. Реконструкции предприятия должно предшествовать: разработка стратегического плана развития предприятия, поиск заказов и организация разработки проектов, над которыми работают производственные команды, способные работать над новыми проектами.

5. Политика постоянного улучшения качества - основана на убеждениях о невозможности длительного скачкообразного повышения качества за счет введения новых технологий. Работа по улучшению качества, как правило, имеет начало, но не имеет конца. Поэтому политика организации должна предусматривать поощрение и содействие добровольным инициативам работников по анализу возможностей осуществления улучшений производственных процессов и их реальному практическому использованию.

Как видно из вышеизложенного, современная концепция всеобщего управления качеством представляет собой взаимосвязь различных взглядов на проблему качества. Независимо от этого стремление к обеспечению заданного уровня качества должно сопровождать изделие на всех этапах: исследования, проектирования, изготовления и эксплуатации.

Последующие этапы развития концепции качества, особенно для высокотехнологических производств, прогнозируется в работе [1]. Предполагается, что концепция качества будет эволюционировать в направлении "обеспечения бизнеса" (Business assurance - BA) или, точнее, - "долгосрочного обеспечения бизнеса" (Long-term business assurance - LTBA). Качество станет в большей степени стратегическим средством, связанным с рынком. Отношения между поставщиками и потребителями перейдут в партнерские, при которых обеспечение "соответствия требованиям" дополняется доверием друг к другу. Озабоченность и понимание проблемы будут существовать еще в большей мере как на уровне руководства компании, так и на уровне руководителей проектов и поэтому концепция качества - концепция долгосрочного обеспечения бизнеса (LTBA) - станет культурой руководства на грядущие десятилетия.

Из сказанного выше можно заключить, что для того, чтобы по конкурентоспособности основной номенклатуры нефтепромышленной техники в ближайшие годы можно было бы приблизиться к передовому мировому уровню необходимо большее внимание уделить созданию систем управления качеством. При этом необходимо использовать сформированные в новых стандартах ISO-9001 требования к системам управления качеством с использованием восьми принципов менеджмента качества. Эти принципы следующие [1]:

Ориентация предприятия или организации на заказчика. Предприятия зависят от своих заказчиков и поэтому должны понимать текущие и будущие потребности заказчика, выполнять требования заказчика и стремиться превзойти его ожидания.

Ведущая роль руководителя. Руководители устанавливают единство целей, направлений и микроклимат организаций. Они должны создавать и поддерживать такую внутреннюю обстановку, в которой люди могут быть полностью вовлечены в достижение целей, поставленных организацией.

Вовлечение людей. Люди на всех уровнях составляют сущность организации. Их полное вовлечение дает возможность использовать их способности для получения максимальной выгоды для организации.

Процессный подход. Желаемый результат достигается более эффективным способом, если соответствующими ресурсами и деятельностью управляют как процессом.

Системный подход к управлению. Выявление, понимание и управление системой взаимосвязанных процессов, направленных на

достижение поставленной цели, повышает результативность и эффективность организации.

Постоянное улучшение. Неизменной целью организации является постоянное улучшение качества.

Подход к принятию решений, основанных на фактах. Эффективные решения основываются на анализе данных и информации.

Взаимовыгодные отношения с поставщиками. Организация и ее поставщики взаимозависимы. Взаимовыгодные отношения между ними способствуют расширению возможностей каждого из них создавать ценности.

Предметное содержание отрасли нефтяного машиностроения значительно отличается от других отраслей и характеризуется явно выраженной специфичностью эксплуатационно-технологических функций, высоким уровнем нагруженности и крайне неблагоприятными условиями эксплуатации. Конструкции и функции многих видов нефтепромыслового оборудования (таких как скважинные насосы, долота, вертлюги, турбобуры, элеваторы и др.) сугубо специфичны и не имеют прототипов среди изделий общемашиностроительного применения. Большая номенклатура, наличие порой значительного числа типоразмеров оборудования и инструмента приводит к необходимости изготовления их мелкими сериями, что создает определенные трудности в производстве, отражается на качестве изготовления продукции и ее безотказности в эксплуатации.

Применительно к нефтепромысловому оборудованию теория надежности развивалась вначале как прикладное инженерное направление.

На первом этапе наметились определенные тенденции в направлении работ в области надежности: использование стандартных статистических методов, получение количественных оценок показателей надежности. Были проведены многочисленные исследования, разработаны необходимые теоретические и методические положения, опубликованы обзорные и справочные материалы, разработаны нормативные отраслевые материалы. Статистические исследования безотказности сочетались с изучением физических причин, вызывающих те или иные отказы оборудования. Это позволило при модернизации существующих и проектировании новых видов оборудования обеспечить некоторое повышение уровня надежности, в основном за счет технологических методов увеличения ресурса отдельных лимитирующих деталей и сборочных единиц.

На последующих этапах развития теории надежности, наряду с общими требованиями функционирования нефтепромыслового

оборудования, учитывались и специфические условия его эксплуатации, которые выдвигают ряд дополнительных требований по обеспечению надежности. К ним, в частности, относятся требования защиты от загрязнения окружающей среды и исключения при отказах травмирования обслуживающего персонала.

Перечисленные вопросы повышения качества и надежности, и в том числе повышения технологичности конструкций нефтепромыслового оборудования, нашли отражение в ряде опубликованных в последние годы работ [12, 15, 16, 17, 30 и др.]. На основе рекомендаций этих работ на рис. 12.1 приведен алгоритм последовательности и содержания разработок по обеспечению на стадии проектирования повышения технического уровня, надежности и технологичности оборудования, подвергаемого в эксплуатации периодическим повторным разборочно-сборочным и демонтажно-монтажным работам.

Указывая перспективные задачи и направления развития проблемы надежности, нельзя не учитывать и рекомендации ведущих специалистов в этой области [23], имеющие в том числе и прикладное значение для различных отраслей, включая и нефтепромысловое машиностроение. Исходя из этого, некоторые современные проблемы теории и практики надежности нефтепромыслового оборудования можно сформулировать следующим образом [1, 5, 16]:

1. Надежность нельзя рассматривать в отрыве от общей проблемы повышения качества, когда концепция качества становится все в большей степени стратегическим средством, связанным с рынком. Появление концепции "всеобщее управление качеством" (Total Quality Management - TQM) представляет собой интегрированные усилия компаний и фирм на всех уровнях по непрерывному совершенствованию действий, направленных на улучшение их деятельности, в первую очередь, в части повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, а следовательно, и ее надежности.

2. Как отмечается, повышение надежности элементной базы отстает от требований практики. Системы становятся все более сложными, имеют в своем составе все большее число электронных, гидравлических, пневматических и других подсистем, эксплуатируются во все более напряженных условиях. Это приводит к необходимости изыскания различных методов повышения надежности, и в первую очередь, введения избыточности на структурном и функциональном уровнях. Последнее характерно, например, для систем

Алгоритм последовательности и содержания разработок по обеспечению на стадии проектирования необходимого уровня надежности и технологичности



Рис. 12.1.

сбора, подготовки и транспорта продукции, применяемых на морских нефтяных месторождениях.

3. На многих передовых предприятиях развитие получают гибкие автоматизированные производства. Практически - это совокупность в разных сочетаниях оборудования с программным управлением, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей и других единиц технологического оснащения, обладающих свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры. Для реализации гибких автоматизированных производств, с высоким уровнем безотказности комплексов, методы традиционной теории надежности в чистом виде не применимы. Поэтому в силу их многофункциональности, применение подобных технологий требует создания нового уровня техники, что, в свою очередь, создает новые проблемы обеспечения надежности.

4. Дальнейшее развитие должна получить научная база проблемы надежности. Прежде всего это касается вопросов технической диагностики - определения оптимальных сроков проведения различного рода регламентных проверок, предупредительных замен, технического обслуживания и ремонтов. Один из основоположников теории надежности, Б.В.Гнеденко, отмечает, что основной путь здесь лежит через создание адаптивных моделей, которые могли бы настраиваться по мере накопления статистической информации по результатам реальной эксплуатации.

5. Определенного развития требуют также: методы оценки статистических характеристик элементов, распределение которых связано с монотонной функцией интенсивности отказов; методы имитационного и в том числе статистического моделирования; оптимизационные методы надежности, обеспечивающие максимальный общий экономический эффект, и другие.

Что касается развития отечественного нефтяного машиностроения, то, учитывая значительное отставание отечественной техники от передового мирового уровня, следует обеспечить более быстрый рост ее качества и надежности, чем у зарубежных производителей. Только в этом случае можно в перспективе рассчитывать на обеспечение необходимого уровня надежности, а следовательно, и конкурентоспособности наших изделий.

Важную роль в решении проблемы должно сыграть также дальнейшее углубление обучения теории и практике надежности в вузах, в особенности по специальностям, связанным с машинами и оборудованием конкретного назначения.

Литература

1. Babayev S.H. Azərbaycan neft-qaz sənayesinin yüksək keyfiyyəti və etibarlı avadanlıqlarla təmin edilməsi problemləri. Azərbaycan ali texniki məktəblərinin xəbərləri, 2003, №2. – S. 33 – 38.
2. Hüseynov Ə.G. Maşınların təmir texnologiyası. Dərslik.-Bakı, Elm, 2006. – 478 s.
3. Məmmədov N.R. Sertifikatlaşdırmanın əsasları. Dərs vəsaiti. – Bakı, Elm, 2001. – 312 s.
4. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. М., изд. стандартов, 1987. – 184 с.
5. Бабаев С.Г. Некоторые современные проблемы надежности нефтепромыслового оборудования. ИВТУЗ Азербайджана. 2000, №3 – 4. – С. 77-81.
6. Бабаев С.Г. Надежность нефтепромыслового оборудования. М., Недра, 1987. – 264 с.
7. Бабаев С.Г. Алиев В.К. К оценке надежности манифольдов противовыбросового оборудования. Баку, ИВУЗ «Нефть и газ», 1979, №1. – С. 17 – 23.
8. Бабаев С.Г., Аронов И.З., Журцев М.В. Планирование периодических испытаний на надежность бурового оборудования. Сборник научных трудов АЗИНЕФТЕХИМ «Теоретические и практические основы оптимального проектирования конструкций нефтепромыслового оборудования». Баку: изд. АЗИНЕФТЕХИМ, 1987. – С. 7 – 9.
9. Бабаев С.Г., Аронов И.З., Журцев М.В. Выбор рациональных планов определительных испытаний на надежность нефтепромыслового оборудования. Сборник научных трудов АЗИНЕФТЕХИМ «Повышение надежности нефтепромыслового оборудования». Баку: изд. АЗИНЕФТЕХИМ, 1986. – С. 3 – 6.
10. Бабаев С.Г., Бебирли Н.М., Эпштейн Э.М. Надежность и безопасность бурового оборудования. Обзорная информация «Нефтепромысловое машиностроение». Серия ХМ-3. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. – 28 с.
11. Бабаев С.Г., Васильев Ю.А. Повышение надежности оборудования, применяемого для бурения на нефть и газ. М.: Машиностроение, 1972.-161 с.

12. Бабаев С.Г., Габибов И.А., Курбанов Ф.М., Исмаилов Э.Г. Основные элементы системы управления качеством ремонта машин и оборудования. Баку, Маариф, 2003.-99с.
13. Бабаев С.Г., Габибов И.А., Меликов Р.Х. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Надежность нефтепромышленного оборудования» по специальности 050646 – «Инженерные технологии повторной обработки и восстановления». Баку, изд. АГНА, 2013.- 93 с.
14. Бабаев С.Г., Габибов И.А., Меликов Р.Х. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Надежность нефтепромышленного оборудования» по специальности 050646 – «Инженерные технологии повторной обработки и восстановления». Баку, изд. АГНА, 2013. - 146 с.
15. Бабаев С.Г., Кадиров А.Д., Абдурахманов Ф.Г. Прогнозирование потребности в запасных частях для текущих ремонтов нефтепромышленного оборудования. Баку, АГНА, 2006.- 76 с.
16. Бабаев С.Г., Керимова Л.С. Повышение качества и надежности нефтепромышленного оборудования, Баку: Элм, 1996 - 562 с.
17. Бабаев С.Г., Левицки Р. Ремонтная технологичность нефтепромышленного оборудования. Обзорная информация. Серия ХМ-3. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. - 56 с.
18. Бабаев С.Г., Мамедов Н.Р., Габибов И.А., Керимов С.С. Повышение монтажепригодности нефтепромышленного оборудования. Баку, Элм, 1997. - 230 с.
19. Бабаев С.Г., Эпштейн Э.М., Алиев В.К. Надежность блочного автоматизированного технологического оборудования морских месторождений нефти и газа. Обзорная информация. Серия ХМ-3 «Нефтепромышленное машиностроение». М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1981. - 32 с.
20. Бабаев С.Г., Эпштейн Э.М., Алиев В.К., Ахмедов Б.М. Надежность оборудования морских систем сбора, подготовки и транспорта продукции. Экспресс информация. № 15-79. Серия «Качество. Надежность. Долговечность». М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. - 18 с.
21. Бабаев С.Г., Шахбазов Э.К. Исследование эксплуатационных показателей надежности подъемных установок для текущего и капитального ремонта скважин. Обзорная информация. Серия ХМ-3 «Нефтепромышленное машиностроение». М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1982. - 22 с.

22. Владимиров А.И., Кершенбаум В.Я. Конкурентоспособность и проблемы нефтегазового комплекса. М., НП «Национальный институт нефти и газа», 2004. - 640 с.
23. Вопросы математической теории надежности /Под ред. Б.В. Гнеденко. М., Радио и связь, 1983. - 376 с.
24. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М., Сов. Радио, 1996. - 166 с.
25. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М., Наука, 1987. - 336 с.
26. Джамалов А.Т., Бабаев С.Г., Габибов И.А. Надежность систем учета потребления газа. Баку, Элм, 1998.-114с.
27. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. Е.Г. Коваленко /Под ред. И.А. Ушакова. М., изд. Мир, 1980. - 604 с.
28. Керимова Л.С. Методы формирования условных подсистем для поэтапного повышения надежности нефтепромыслового оборудования. М., «Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа», 2000, №4. С. 34-36.
29. Керимова Л.С. Оценка технико-экономических показателей передвижных подъемных установок повышенной надежности. Азербайджанское нефтяное хозяйство, 1992, №2-3. - С. 64-68.
30. Керимова Л.С. Система обеспечения эффективного функционирования нефтепромыслового оборудования. Баку, Чашыоглы, 1999. - 72 с.
31. Керимова Л.С., Кадиров А.Д. К определению межрегламентного ресурса нефтепромыслового оборудования. Баку, «Механика. Машиностроение», 2006, №2.-с.45 - 46
32. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М., ЮНИТИ - ДАНА, 2007. - 551 с.
33. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении М., изд. стандартов, 1989. - 224 с.
34. Кузьменков П.Г. Ремонт бурового оборудования. М, Нефть и газ, 2004. - 258 с.
35. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. ГОСТ 27.410-87. М., ИПК изд. стандартов, 2002.-77с.
36. Методические указания. ЕСТПП. Средства измерений и автоматизации. Общие требования к надежности. РД 50-257-81. М., изд. стандартов 1982. - 80 с.

37. Методические указания «Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным». РД 50-690-89. М.: изд. стандартов, 1990. 132 с.
38. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник. В 4-х т. Т.3. Надежность систем газо- и нефтеснабжения. В 2-х кн./Под ред. М.Г.Сухарева. - М., Недра, 1994. Кн. 1-414 с.; кн. 2 - 288 с.
39. Надежность технических систем: Справочник /Под ред. И.А. Ушакова. М., Радио и связь, 1985. - 605 с.
40. Протасов В.Н., Султанов Б.З., Кривенков С.В. Эксплуатация оборудования для бурения скважин и нефтегазодобычи. М., Недра, 2004. - 691 с.
41. Раджабов Н.А. Установки для бурения и ремонта нефтяных и газовых скважин. Теоретические основы расчета показателей назначения и надежности подъемных механизмов. Баку, Азернешр, 1995. - 232 с.
42. Рекомендации. «Надежность в технике. Обеспечение надежности изделий. Общие требования». Р 50-109-89. М., изд. стандартов, 1989. - 15 с.
43. Руководящий документ «Методика обоснования и выбора номенклатуры основных показателей для расчета надежности нефтепромыслового оборудования». RS 00220664-07-99. Баку, 1999. - 18 с.
44. Руководящий документ «Методика определения оптимальной периодичности контроля технического состояния нефтепромыслового оборудования». RS 00220664-06-99. Баку, 1999. - 13 с.
45. Руководящий документ «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований к надежности» РД 50-550-87. М., изд. стандартов, 1988. - 29 с.
46. Руководящий документ «Монтажепригодность нефтепромыслового оборудования. Термины, определения, номенклатура показателей и методы оценки». РД 26-16-45-97. Баку, изд. АГНА, 1997. - 32 с.
47. Руководящий документ стандартизации «Методика оценки отказов бурового оборудования, связанных с производственным травматизмом». РДС 014717-001-83. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1984. - 47 с.
48. Руководящий нормативный документ «Системы сбора, подготовки и транспорта продукции месторождения нефти и

- газа континентального шельфа. Методика расчета надежности». РД-51.47-82. М., ВНИИморнефтегаз, 1982. – 43 с.
49. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. М., Машиностроение, 2003. - 320 с.
50. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М., Машиностроение, 1986. - 224 с.
51. Шахбазов Э.К., Гаджиев С.К., Мусаев И.Д., Повышение надежности и эффективности эксплуатации насосных установок для цементирования скважин. Баку, Элм, 1998. - 68 с.
52. Яшура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования. Справочник /М., ЭНАС, 2012.-360с.

Содержание

Введение.....	3
1. Конструктивные особенности нефтепромыслового оборудования и требования к его надежности.....	5
1.1. Краткая характеристика применяемого оборудования..	5
1.2. Особенности условий эксплуатации нефтепромыслового оборудования.....	15
1.3. Принцип системности - решающий фактор формирования и управления надежностью.....	20
2. Основные понятия теории надежности.....	35
2.1. Термины, определения и характеристики надежности..	35
2.2. Количественные показатели надежности.....	39
2.2.1. Показатели безотказности.....	43
2.2.2. Показатели долговечности.....	50
2.2.3. Показатели ремонтпригодности.....	52
2.2.4. Показатели монтажепригодности.....	54
2.2.5. Показатели сохраняемости.....	57
2.2.6. Комплексные показатели надежности.....	57
2.3. Дополнительные количественные показатели надежности.....	61
2.3.1. Показатели безотказности устройств, находящихся в режиме ожидания.....	61
2.3.2. Показатели надежности для оценки опасных отказов.....	65
3. Вероятностные законы распределения.....	69
3.1. Дискретные распределения.....	69
3.2. Непрерывные распределения.....	72
3.3. Накопление и обработка статистических данных о надежности оборудования.....	80
3.4. Результаты оценки безотказности и ремонтпригодности нефтепромыслового оборудования.....	87
3.4.1. Установки АЗИНМАШ-43П.....	88
3.4.2. Установки АЗИНМАШ-37А, УПТ-32 и ЛПТ-8.....	92
4. Структурный анализ надежности технических систем.....	99
4.1. Проектный расчет надежности.....	99
4.2. Проектный расчет надежности манифольдов противовыбросового оборудования.....	105
5. Нормирование показателей надежности.....	116
5.1. Расчет нормированных показателей безотказности.....	119

5.2. Распределение норм надежности по элементам системы с преобладанием внезапных отказов.....	123
5.3. Определение требуемого уровня безотказности сборочных единиц нефтепромыслового насоса.....	126
5.4. Вероятность выполнения монтажных работ в заданное время.....	131
6. Обеспечение ремонтной технологичности нефтепромыслового оборудования.....	138
6.1. Оценка уровня ремонтной технологичности.....	141
6.1.1. Методика комплексной оценки уровня ремонтной технологичности.....	141
6.1.2. Исходные данные для оценки ремонтной технологичности.....	149
6.1.3. Влияние распределения времени доступа по уровням на степень совершенства конструкции...	161
6.2. Практическое применение методики комплексной оценки уровня ремонтной технологичности.....	174
6.2.1. Исходные данные для оценки ремонтной технологичности передвижной подъемной установки.....	174
6.2.2. Качественная оценка ремонтной технологичности конструкции.....	179
6.2.3. Результаты оценки ремонтной технологичности конструкции.....	185
6.2.4. Повышение ремонтной технологичности коробки перемены передач подъемной установки.....	190
6.2.5. Количественная оценка ремонтной технологичности коробки перемены передач подъемной установки АЗИНМАШ-43П.....	192
7. Обеспечение эксплуатационной и монтажной технологичности.....	195
7.1. Количественные показатели для оценки уровня эксплуатационной и монтажной технологичности.....	196
7.2. Прогнозирование эксплуатационной технологичности.....	205
7.3. Оценка доступности к объектам технического обслуживания и ремонта.....	211
8. Надежность оборудования морских систем сбора, подготовки и транспорта продукции.....	214
8.1. Классификация отказов системы СПТП и выбор нормируемых показателей надежности.....	217

8.2. Оценка надежности систем сбора и подготовки продукции морских месторождений.....	222
8.3. Расчет надежности системы СПТП на стадии проектирования.....	229
8.4. Пример расчета надежности технологической системы.....	238
9. Обеспечение работоспособности оборудования в установившихся условиях эксплуатации.....	244
9.1. Рекомендации по составу и содержанию системы технического обслуживания.....	244
9.2. Определение оптимальной периодичности контроля технического состояния оборудования.....	256
9.3. Повышение межрегламентного ресурса оборудования.....	265
9.3.1. Определение периодичности технического обслуживания.....	269
9.3.2. Определение периодичности проведения текущих ремонтов.....	271
9.3.3. Оценка остаточного межремонтного ресурса оборудования.....	278
9.4. Оценка нештатных ситуаций при текущих ремонтах..	281
9.5. Определение состава запасных частей для обеспечения необходимого уровня надежности оборудования.....	287
9.5.1. Определение номенклатуры запасных частей....	287
9.5.2. Определение потребности в запасных частях....	289
9.6. Расчет потребности в запасных частях для текущего ремонта нефтепромысловых и буровых насосов.....	295
9.7. Концентрация и специализация технического обслуживания оборудования.....	302
10. Определительные, контрольные и ускоренные испытания на надежность.....	311
10.1. Определительные испытания на надежность.....	313
10.1.1. Определительные испытания на безотказность.....	314
10.1.2. Определительные испытания на ремонтпригодность.....	316
10.1.3. Примеры планирования определительных испытаний на безотказность.....	317
10.2. Контрольные испытания на надежность.....	319
10.2.1. Контрольные испытания на безотказность.....	320

10.2.2. Контрольные испытания на ремонтпригодность.....	321
10.2.3. Пример планирования контрольных испытаний на ремонтпригодность.....	322
10.3. Ускоренные испытания оборудования на надежность.....	323
10.4. Предварительная оценка результатов испытаний.....	332
11. Повышение технического уровня и надежности нефтепромыслового оборудования.....	337
11.1. Рекомендации по составу и порядку выполнения работ по обеспечению надежности изделий техники.....	337
11.1.1. Общие положения.....	337
11.1.2. Состав работ по обеспечению надежности на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.....	338
11.1.3. Состав работ по обеспечению надежности на стадии серийного изготовления.....	339
11.1.4. Состав работ по обеспечению надежности на стадии эксплуатации.....	340
11.1.5. Содержание, порядок разработки, согласования, утверждения и оформления программы обеспечения надежности.....	341
11.1.6. Типовой перечень мероприятий по обеспечению надежности.....	342
11.2. Повышение надежности путем поэтапного совершенствования конструкции.....	351
11.2.1. Формирование условных подсистем на основе категорий отказов деталей и сборочных единиц.....	355
11.2.2. Формирование условных подсистем на основе ранжирования ремонтных затрат.....	361
11.3. Оценка технико-экономической эффективности повышения надежности оборудования.....	368
11.3.1. Оценка технико-экономических показателей передвижных подъемных установок.....	371
12. Современные проблемы обеспечения конкурентоспособности, качества и надежности нефтепромыслового оборудования.....	376
Литература.....	391

Babayev Sabir Həbib oğlu

Həbibov İbrahim Əbülfəz oğlu

Məlikov Rauf Xəlil oğlu

Neftmədən avadanlıqlarının etibarlığının nəzəri əsasları

Çapa imzalanmışdır: 23.02.2015. Kağız formatı 60x84 1/16
mətbəə kağızı. Çapı əfset üsulu ilə. Həcmi 26. fiz.çap Vərəqi.
Tiraj 200Qiyəti müqavilə yolu ilə.

Azərbaycan Dövlət Neft Akademiyasının mətbəəsi
Bakı- 370601. Azadlıq prospekti, 34. Tel.: 493-44-11



Бабаев Сабир Габиб оглы - доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и обработка материалов» Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии, Заслуженный деятель науки Азербайджанской Республики.



Габибов Ибрагим Абульфас оглы - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная графика» Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии.



Меликов Рауф Халил оглы - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и обработка материалов» Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии.