

Е.А. Богданов

Основы технической диагностики нефтегазового оборудования

Допущено

Министерством образования и науки

Российской Федерации в качестве учебного пособия

для студентов высших учебных заведений,

обучающихся по специальностям

«Морские нефтегазовые сооружения»

и «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

направления подготовки

«Оборудование и агрегаты нефтегазового производства»



Москва
«Высшая школа»
2006

УДК 621.6
ББК 30.82
Б73

Рецензенты:

кафедра машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов Архангельского государственного технического университета (зав. кафедрой *А.Э. Абанов*); директор ЗАО «Санкт-Петербургская техническая экспертная компания» по научной и экспертной работе, д-р техн. наук, проф. *О.А. Бардышев*

Богданов, Е. А.

Б73 Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. пособие для вузов / Е. А. Богданов. — М.: Высш. шк., 2006. — 279 с.: ил.

ISBN 5-06-005442-X

В книге изложены основные методы контроля, применяемые при проведении технической диагностики газонефтепромыслового оборудования. Рассмотрены методики диагностирования ряда типовых видов оборудования и оценки его остаточного ресурса.

Для студентов, обучающихся по специальностям «Морские нефтегазовые сооружения» и «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» направления подготовки дипломированных специалистов «Оборудование и агрегаты нефтегазового производства». Пособие может быть полезно инженерно-техническим работникам производственных предприятий и экспертных организаций, занимающихся вопросами диагностики.

УДК 621.6
ББК 30.82

ISBN 5-06-005442-X

© ФГУП «Издательство «Высшая школа», 2006

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

Предисловие

Сведения, необходимые для получения знаний по технической диагностике нефтегазового оборудования, приведены в большом числе различных источников: справочниках, технических обзорах, стандартах, научных статьях, руководящих и нормативных документах и т.д. Эти источники, как правило, недоступны для студентов, особенно для тех, кто учится заочно. Данное пособие охватывает основной комплекс вопросов курса технической диагностики нефтегазового оборудования, обобщая последние достижения науки и производства в этой области.

Учебное пособие разработано в соответствии с программой курса подготовки специалистов по специальностям «Морские нефтегазовые сооружения» и «Оборудование нефтяных и газовых промыслов». При подготовке книги использованы материалы лекций, прочитанных автором в институте нефти и газа Архангельского государственного технического университета, а также опубликованные труды российских ученых, материалы школы-семинара «ДИАТЭКС», действующие нормативно-технические документы.

В учебном пособии освещены следующие основные вопросы: задачи и системы технической диагностики; физические основы методов неразрушающего контроля; деградационные процессы и расчеты остаточного ресурса; особенности диагностирования типовых видов оборудования добычи, транспортировки и хранения нефти и газа. Все учебные материалы разбиты по темам. Из-за ограничения объема ряд тем изложен кратко: на уровне пояснения физической сущности соответствующего метода или способа. Пособие не претендует на полный охват всех аспектов технической диагностики.

Автор выражает благодарность рецензентам за ряд ценных замечаний, учтенных при работе над книгой.

1. ЗАДАЧИ, СИСТЕМЫ И ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

1.1. Цель и задачи технической диагностики

Техническая диагностика — молодая наука, возникшая в последние десятилетия в связи с потребностями современной техники. Все возрастающее значение сложных и дорогостоящих технических систем, применяемых при добыче, транспортировке и переработке нефти и газа, требования их безопасности, безотказности и долговечности делают весьма важной оценку состояния системы, ее надежности.

Уровень безопасности связан со свойствами перерабатываемых веществ, режимами и условиями эксплуатации оборудования, его техническим состоянием. Техническая диагностика является одним из основных элементов системы управления промышленной безопасностью в России. Общие требования по безопасности промышленных объектов установлены Федеральным законом Российской Федерации «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» № 116-ФЗ от 20 июля 1997 г. Этот закон обязывает организации, эксплуатирующие опасные производственные объекты (к ним относятся все объекты нефтегазовой промышленности), проводить диагностику и испытания технических устройств, оборудования и сооружений в установленные сроки и в установленном порядке. Диагностика, в том числе с использованием методов неразрушающего контроля, может проводиться как самой эксплуатирующей организацией, так и с привлечением специализированной организации (имеющей соответствующую лицензию) в составе экспертизы промышленной безопасности. Надзор за безопасностью потенциально опасных производственных объектов осуществляется государственными надзорными органами: Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, МЧС, Минэнерго, ГУПО МВД, каждым по своей части.

Техническая диагностика — наука о распознавании состояния технической системы, включающая широкий круг проблем, связанных с получением и оценкой диагностической информации. Термин «диагностика» происходит от греческого слова «*διαγνωσις*», что означает распознавание, определение. В процессе диагностики устанавливается диагноз, т. е. определяется состояние больного (медицинская диагностика) или состояние технической системы (техническая диагностика). Согласно ГОСТ 20911–89, техническая диагностика — область знаний, охватывающих теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Здесь и далее инте-

ресующими нас объектами являются буровое и газонефтепромысловое оборудование, газонефтепроводы и нефтехранилища.

Целью технической диагностики являются определение возможности и условий дальнейшей эксплуатации диагностируемого оборудования и в конечном итоге повышение промышленной и экологической безопасности. Задачами технической диагностики, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, являются:

- обнаружение дефектов и несоответствий, установление причин их появления и на этой основе определение технического состояния оборудования;
- прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса (определение с заданной вероятностью интервала времени, в течение которого сохранится работоспособное состояние оборудования).

Таким образом, техническая диагностика решает обширный круг задач, многие из которых являются смежными с задачами других научных дисциплин. Основной проблемой технической диагностики является *распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации*.

Решение перечисленных задач, особенно для сложных технических систем и оборудования, позволяет получить большой экономический эффект и повысить промышленную безопасность соответствующих опасных производственных объектов. Техническая диагностика благодаря раннему обнаружению дефектов позволяет предотвратить внезапные отказы оборудования, что повышает надежность, эффективность и безопасность промышленных производств, а также дает возможность эксплуатации сложных технических систем по фактическому техническому состоянию. Эксплуатация по техническому состоянию может принести выгоду, эквивалентную стоимости 30 % общего парка машин.

1.2. Виды дефектов, качество и надежность машин

Техническое состояние оборудования определяется числом дефектов и степенью их опасности. **Дефектом** называют каждое отдельное несоответствие детали или технической системы требованиям, установленным технической документацией. По расположению дефекты подразделяют на наружные и внутренние (скрытые). Наружные дефекты чаще всего обнаруживают визуально, скрытые — посредством различных методов неразрушающего контроля. По форме дефекты бывают объемные и плоскостные. Объемные проявляются в виде изменения (искажения) начальной формы или размеров объекта, плоскостные — в виде трещин или полос скольжения. По происхождению дефекты подразделяют на производственные и эксплуатационные. Производственные дефекты могут быть металлургически-

ми, возникающими в процессе металлургического передела, и технологическими, возникающими при изготовлении детали. Такие дефекты обычно проявляются в начальный период работы оборудования — период приработки. Эксплуатационные дефекты возникают после некоторой наработки в результате износа, накопления усталостных и иных повреждений, а также из-за неправильного технического обслуживания и ремонта. Практика показывает, что можно выделить следующие основные причины накопления дефектов и повреждений, приводящих к отказам оборудования по мере его эксплуатации:

- сквозные трещины, разрушения и деформации элементов оборудования, возникающие при превышении допускаемых напряжений;
- механический износ, обусловленный трением сопрягаемых поверхностей;
- эрозионно-кавитационные повреждения, вызванные воздействием потока жидкости или газа;
- деградация свойств материалов с течением времени и под воздействием эксплуатационных факторов;
- коррозия металлов и сплавов, коррозионно-механические повреждения, возникающие под влиянием коррозии, напряжений, трения и т.п.

По степени опасности дефекты разделяют на критические, значительные и малозначительные. Критическими являются дефекты, при наличии которых использование агрегата невозможно или недопустимо по условиям безопасности. К значительным относят дефекты, существенно влияющие на использование агрегата по назначению или на его долговечность. Малозначительные соответственно не оказывают существенного влияния ни на использование агрегата по назначению, ни на его долговечность.

При определении степени опасности дефекта учитывают напряженное состояние контролируемого изделия, вид дефекта, его размеры и ориентацию относительно действующих напряжений. Основными факторами, определяющими степень опасности дефекта, являются величина утонения герметичных перегородок и коэффициент концентрации механических напряжений (в трещинах — коэффициент интенсивности напряжений), показывающий, во сколько раз максимальные местные напряжения в зоне дефекта выше, чем в бездефектной зоне. Виды допустимых дефектов и их величины приводятся в нормативной документации на контроль соответствующего изделия. Наиболее опасными являются плоскостные трещиноподобные дефекты, располагающиеся перпендикулярно действующим напряжениям. Основным параметром, характеризующим уровень концентрации напряжений в вершинах трещин, является критический коэффициент интенсивности напряжений (см. 12.4).

Совокупность свойств, определяющих степень пригодности машины для использования по назначению, называется **качеством**. Эти свойства характеризуются эксплуатационными показателями (мощ-

ность, расход топлива, скорость, производительность и т.д.), экономической эффективностью, технологичностью, показателями эстетики и эргономики, надежностью.

Надежность эксплуатируемой машины определяется в первую очередь ее техническим состоянием. По ГОСТ 27.002–83 **надежность** — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. Надежность оценивается безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью, ресурсом, а также сочетанием или совокупностью этих свойств.

Безотказность — свойство оборудования сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность — свойство оборудования сохранять работоспособность в заданных условиях эксплуатации вплоть до наступления предельного состояния.

Ремонтпригодность — способность оборудования к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и повреждений при проведении технических обслуживаний и ремонтов.

Ресурс — наработка оборудования от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Из-за большого числа конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на надежность, точно ее рассчитать или предсказать нельзя. Надежность можно оценить только приближенно путем расчета с использованием теории вероятностей и математической статистики или специально организованных испытаний, а также сбора эксплуатационных данных об отказах.

Для оценки фактического технического состояния и контроля надежности оборудования (его основных узлов) производится анализ данных по временным показателям надежности оборудования — ресурсу, сроку службы, наработке (суммарной — с начала эксплуатации, с момента проведения последнего капитального ремонта). Показатели надежности, определяемые по годам за период не менее двух лет эксплуатации в соответствии с ГОСТ 27.002–83, рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 1.1.

На основе анализа количественных показателей надежности принимается решение о необходимости проведения диагностики оборудования, его ремонта или замены. Уровень количественных оценок различается в зависимости от типа оборудования. Так, для магистральных насосно-перекачивающих станций при снижении величины средней наработки на отказ на 10 %, вероятности безотказной работы на 3 % оборудование, независимо от выработки назначенного ресурса, подлежит техническому освидетельствованию. Снижение коэффициента технического использования оборудования на 3...5 % свидетельствует о необходимости проведения экономической оценки целесообразности его дальнейшей эксплуатации.

Таблица 1.1

Наименование и условное обозначение показателя по ГОСТ 27.002	Формула для расчета статистической оценки показателя надежности
Средняя наработка на отказ (наработка на отказ) $\bar{T}$	$\bar{T} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i$
Средний ресурс (средний срок службы) $\bar{D}$	$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{\text{рес}j}$
Среднее время внепланового восстановления (ремонта) $\bar{T}_в$	$\bar{T}_в = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_{вi}$
Среднее время планового восстановления (ремонта) $\bar{T}_{\text{ппр}}$	$\bar{T}_{\text{ппр}} = \frac{1}{N_{\text{ппр}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ппр}}} t_{\text{ппр}i}$
Вероятность безотказной работы $P(t)$	$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{n}$
Коэффициент технического использования $K_{\text{т.и}}$	$K_{\text{т.и}} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{T}_в + \bar{T}_{\text{ппр}}}$

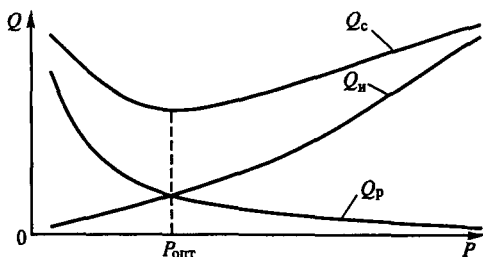
Примечания:

- r — число отказов, произошедших за период наблюдений t ;
 t_i — наработка между двумя последовательными отказами;
 n — число объектов, работоспособных в начальный момент времени (эксплуатационных наблюдений) $t = 0$;
 $t_{\text{рес}j}$ — наработка каждого из объектов от начала эксплуатации;
 $t_{вi}$ — продолжительность внепланового восстановления после i -го отказа оборудования;
 $t_{\text{ппр}i}$ — продолжительность i -го планового восстановления оборудования;
 $N_{\text{ппр}}$ — число плановых ремонтов оборудования за период наблюдений t ;
 $n(t)$ — число объектов (оборудования), отказавших на отрезке времени $0 \dots t$.

Приведенные определения показывают, что надежность оборудования зависит не только от качества его изготовления, но и от своевременности технического диагностирования и обнаружения дефектов, полноты и качества производимых ремонтов.

Требование повышения надежности оборудования вступает в противоречие с требованием достижения максимального экономического эффекта. Любое повышение надежности достигается за счет увеличения расходов на изготовление машин, оснащения современными системами мониторинга и диагностики их технического состояния. Одновременно с повышением затрат на изготовление машины Q_n с целью повышения ее надежности P уменьшаются затраты на содержание и ремонт Q_p в течение всего срока службы машины (рис. 1.1). Суммарные эксплуатационные затраты $Q_c = Q_n + Q_p$ имеют некоторое минимальное значение, соответствующее оптимальной надежности. Снижение эксплуатационных затрат и потерь от аварий

Рис. 1.1. Затраты на изготовление, ремонт и эксплуатацию оборудования



и простоев оборудования является одним из основных источников повышения рентабельности производственных предприятий.

Наиболее важным показателем надежности является **безотказность**.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности технической системы или ее элементов. Критериями отказов оборудования являются: прекращение функционирования, снижение эксплуатационных параметров за предельно допустимый уровень. Наиболее опасными являются отказы, приводящие к катастрофическим ситуациям, возникновение которых создает угрозу для жизни и здоровья людей, приводит к тяжелым экономическим потерям или причинению большого вреда окружающей среде.

Если последствием отказа является катастрофическая ситуация, то уровень надежности должен задаваться максимально высоким. Экономические вопросы в таком случае не являются первостепенными.

Отказы можно разделить на два вида: внезапные и постепенные. Внезапные отказы происходят в любой момент времени из-за различных непредвиденных обстоятельств: внезапного повышения нагрузки, механического повреждения, стихийных бедствий и др. Появлению постепенных отказов предшествует накопление дефектов и повреждений. Общая закономерность распределения интенсивности отказов по времени приведена на рис. 1.2.

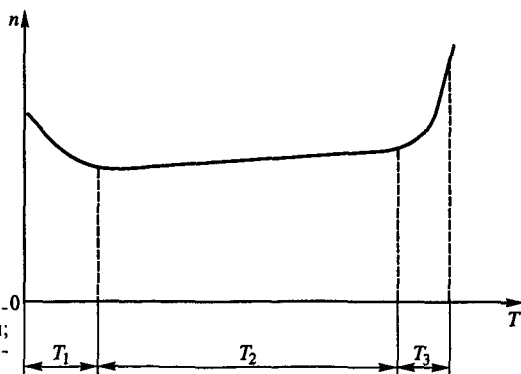


Рис. 1.2. Распределение интенсивности n отказов:

T_1 — период приработки; T_2 — период нормальной эксплуатации; T_3 — период ускоренного накопления повреждений

Начальный и завершающий периоды эксплуатации характеризуются повышенным количеством неисправностей и отказов по сравнению с этапом нормальной эксплуатации. Статистически закономерность увеличения количества отказов на начальном периоде эксплуатации объясняется приработкой деталей и проявлением конструктивных и производственных дефектов. Период нормальной эксплуатации является наиболее продолжительным и характеризуется практически постоянным значением интенсивности отказов. В третьем, завершающем, периоде проявляются так называемые деградационные отказы, интенсивность которых возрастает по мере увеличения износа, накопления микрповреждений и ухудшения (деградации) свойств материалов. При этом с увеличением зазоров в сопряжениях нарушается кинематика механизмов, ухудшаются условия смазки и возникают дополнительные динамические нагрузки. Обеспечить требуемую безотказность оборудования, особенно при монотонном накоплении дефектов и повреждений, исключить аварийные ситуации и минимизировать эксплуатационные затраты возможно только путем проведения своевременной диагностики.

1.3. Восстановление работоспособности оборудования

Из-за износа и накопления повреждений при эксплуатации оборудование подвергается ремонту. Технологическое оборудование в нефтяной и газовой промышленности в обязательном порядке снабжается паспортами. Данные о выполненных ремонтах, техническом обслуживании, испытаниях, а также проведенном диагностировании заносятся в паспорт в течение всего срока эксплуатации оборудования. Такие записи позволяют осуществить систематизацию и ретроспективный анализ накопления дефектов и повреждений, оценить эффективность проведенных ремонтов. Они также обязательно учитываются при проведении очередного технического диагностирования.

По мере эксплуатации и ремонта для каждого оборудования наступает такой момент, когда в результате физического и морального износа его эксплуатация и ремонт становятся невозможными или экономически невыгодными. В этом случае оборудование подвергается замене на новое.

Моральным износом называется уменьшение стоимости действующей техники под влиянием технического прогресса. Различают две формы морального износа:

- утрата действующей стоимости по мере того, как машины такой же конструкции начинают воспроизводиться дешевле;
- обесценивание действующей техники вследствие появления более совершенных конструкций машин.

Согласно РД 22-36-13, оптимальный ресурс машины или ее составной части можно определить из соотношения

$$\frac{1}{t} \left(C_0 + \int_0^t Z_{п.н}(t) dt \right) \rightarrow \min,$$

где C_0 — стоимость объекта; $Z_{п.н}$ — затраты на поддержание надежности объекта по интервалам выработки; t — наработка.

Затраты на поддержание надежности объекта, как правило, можно аппроксимировать функцией вида

$$Z_{п.н}(t) = wt^n,$$

где w — коэффициент; n — показатель уровня надежности машины.

Средние удельные затраты на поддержание надежности объекта за наработку t могут быть определены из следующего выражения:

$$Z_{п.н.ср} = \frac{1}{t} \int_0^t wt^n dt = \frac{w}{n+1} t^n.$$

Оптимальный ресурс определяется из уравнений

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C_0}{t} + \frac{w}{n+1} t^n \right) = 0;$$

$$\frac{C_0}{t^n} - \frac{w}{n+1} t^{n-1} = 0.$$

Решив последнее уравнение относительно t , получим соотношение для определения оптимального ресурса объекта:

$$T_{р. опт} = \sqrt[n+1]{\frac{C_0(n+1)}{wn}}.$$

В общем виде изложенная выше методика позволяет определить предельное состояние любой машины через оптимальное значение затрат на приобретение и эксплуатацию машины.

Для восстановления работоспособности оборудования применяют следующие виды ремонта: реактивный ремонт, планово-предупредительный ремонт (ППР) и ремонт по фактическому техническому состоянию. Реактивная система имеет ограниченное применение и предполагает выполнение ремонта оборудования только в том случае, если оно выходит из строя или полностью вырабатывает свой ресурс. Данную систему применяют при использовании легкозаменяемого недорогого оборудования при наличии дублирования наиболее важных участков технологического процесса.

При невозможности или нецелесообразности дублирования применяют систему ППР, которая представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту, проводимых в плановом порядке. Сущность системы ППР заключается в том, что после отработанного заданного числа часов проводится определенный вид планового ремонта — регламентное техническое обслуживание, текущий, средний и капитальный ремонты.

Техническое обслуживание (ТО) подразделяют на периодическое и сезонное. Сезонное ТО включает сезонную замену сортов масел (зимних или летних), установку или снятие утеплений, предпускового подогрева и т.д. Периодическое ТО регламентируется руководствами по эксплуатации соответствующего оборудования и включает периодическую промывку фильтров, замену шинно-пневматических муфт, регулировку тормозов, осмотр и чистку отдельных узлов, регулировку натяжения и т.д.

Текущий ремонт не бывает продолжительным и часто выполняется одновременно с ТО. В его состав входит устранение небольших неисправностей, замена мелких, быстро изнашивающихся деталей и узлов (например, замена вкладышей подшипников, сальниковых уплотнений, устранение повышенных зазоров, крепеж элементов оборудования и т.д.).

Средний ремонт в отличие от текущего предусматривает замену основных узлов и деталей (например, силовых и трансмиссионных валов, зубчатых колес, крыльчаток центробежных насосов и т.д.) и выполняется, как правило, с полной или частичной разборкой агрегата.

Капитальный ремонт всегда сопряжен с полной разборкой машины и ставит своей задачей замену или восстановление до первоначального состояния всех изношенных узлов и деталей. По окончании ремонта проводятся приемо-сдаточные испытания, в том числе испытания под нагрузкой. Нередко капитальный ремонт совмещают с модернизацией, что позволяет не только полностью восстановить ресурс машины, но и превзойти первоначальные показатели.

Помимо перечисленных возможны также *внеплановые ремонты*, вызванные аварийными отказами оборудования из-за преждевременного износа или форс-мажорных обстоятельств (например, наводнения или оползни, закупорка трубопроводов льдом или гидратами и т.д.).

Период между капитальными ремонтами называют *ремонтным циклом*. Число и последовательность входящих в него ремонтов и осмотров определяют структуру ремонтного цикла, а время между ремонтами — межремонтный период. Для некоторых видов оборудования структура ремонтного цикла может включать в себя не все виды плановых ремонтов. Так, для бурового оборудования средний ремонт не производится, а структура ремонтного цикла, например для буровой лебедки, имеет вид К-9Т-К, для буровых роторов К-7Т-К, где соответственно К — капитальный ремонт, Т — текущий ремонт, 9 и 7 — число текущих ремонтов в цикле.

В практике ресурс однотипного оборудования назначают по наиболее «слабым» экземплярам, показавшим наихудший результат при эксплуатации, поэтому длительность ремонтного цикла и его структуру в системе ППР назначают заведомо такими, чтобы максимально исключить аварии оборудования, особенно связанные с возможностью травмирования людей или большим экономическим или экологическим ущербом. При этом в ремонт, как правило, выводится значительная часть оборудования в достаточно хорошем техническом состоянии с большим остаточным ресурсом, которое могло бы еще долго работать. Более того, отремонтированное таким образом оборудование часто имеет более низкую надежность, что обусловлено появлением ранее отсутствовавших дефектов послеремонтной сборки и повторной приработкой трущихся поверхностей.

Таким образом, основным недостатком системы ППР является проведение преждевременных ремонтов технологического оборудования, что приводит к большим экономическим потерям. Кроме того, ППР не гарантирует полное исключение внезапных отказов оборудования и связанных с этим последствий. Исключить перечисленные недостатки позволяет переход на систему ремонта по фактическому техническому состоянию на основе проведения своевременной диагностики или мониторинга технического состояния оборудования.

В настоящее время системами диагностики и мониторинга в нефтяной и газовой промышленности оснащены большинство агрегатов большой единичной мощности, а также другие виды оборудования, аварии которого чреваты тяжелыми последствиями. Это позволяет планировать и производить ремонт или замену каждого экземпляра оборудования в зависимости от его реального технического состояния.

1.4. Виды состояния оборудования, системы технической диагностики

ГОСТ 20911–89 предусматривает использование двух терминов: «техническое диагностирование» и «контроль технического состояния». Термин «техническое диагностирование» применяют, когда решаемые задачи технического диагностирования, перечисленные в 1.1, равнозначны или основной задачей являются поиск места и определение причин отказа. Термин «контроль технического состояния» применяют, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния.

Различают следующие виды технического состояния, характеризующиеся значением параметров объекта в заданный момент времени:

- исправное — объект соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

- **неисправное** — объект не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

- **работоспособное** — значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

- **неработоспособное** — значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации;

- **предельное** — дальнейшая эксплуатация объекта технически невозможна или нецелесообразна из-за несоответствия требованиям безопасности или неустранимого снижения эффективности работы.

Понятие «исправное состояние» шире, чем понятие «работоспособное состояние». Если объект исправен, он обязательно работоспособен, но работоспособный объект может быть неисправным, так как некоторые неисправности могут быть несущественными, не нарушающими нормальное функционирование объекта.

Для сложных объектов, в частности для магистральных трубопроводов, допускается более глубокая классификация работоспособных состояний с выделением частично работоспособного (частично неработоспособного) состояния, при котором объект способен частично выполнять заданные функции. Примером частично работоспособного состояния служит такое состояние линейной части магистральных трубопроводов, при котором участок способен выполнять требуемые функции по перекачке технологической среды с пониженными показателями, в частности с пониженной производительностью при снижении допускаемого давления (РД 51-4.2-003-97).

Системой технического диагностирования (контроля технического состояния) называют совокупность средств, объекта и исполнителей, необходимую для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации. Объектами технической диагностики являются технологическое оборудование или конкретные производственные процессы.

Средство контроля — техническое устройство, вещество или материал для проведения контроля. Если средство контроля обеспечивает возможность измерения контролируемой величины, то контроль называют измерительным. Средства контроля бывают встроенными, являющимися составной частью объекта, и внешними, выполненными конструктивно отдельно от объекта. Различают также аппаратные и программные средства контроля. К аппаратным относят различные устройства: приборы, пульта, стенды и т.п. Программные средства представляют собой прикладные программы для ЭВМ.

Исполнители — это специалисты службы контроля или технической диагностики, обученные и аттестованные в установленном порядке и имеющие право выполнять контроль и выдавать заключения по его результатам.

Методика контроля — совокупность правил применения определенных принципов и средств контроля. Методика содержит порядок измерения параметров, обработки, анализа и интерпретации результатов.

Для каждого объекта можно указать множество параметров, характеризующих его техническое состояние (ПТС). Их выбирают в зависимости от применяемого метода диагностирования (контроля). Изменения значений ПТС в процессе эксплуатации связаны либо с внешними воздействиями на объект, либо с повреждающими (деградационными) процессами (процессами, приводящими к деградационным отказам из-за старения металла, коррозии и эрозии, усталости и т.д.).

Параметры объекта, используемые при его диагностировании (контроле), называются диагностическими (контролируемыми) параметрами. Следует различать прямые и косвенные диагностические параметры. Прямой структурный параметр (например, износ трущихся элементов, зазор в сопряжении и др.) непосредственно характеризует техническое состояние объекта. Косвенный параметр (например, давление масла, температура, содержание CO_2 в отработанных газах и др.) косвенно характеризует техническое состояние. Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки. Набор диагностических параметров устанавливается в нормативной документации по техническому диагностированию объекта или определяется экспериментально.

Количественные и качественные характеристики диагностических параметров являются признаками того или иного дефекта. У каждого дефекта может быть несколько признаков, в том числе некоторые из них могут быть общими для группы разных по природе дефектов.

Теоретическим фундаментом технической диагностики считают общую теорию распознавания образов, являющуюся разделом технической кибернетики. К решению задачи распознавания существует два подхода: вероятностный и детерминистский. Вероятностный использует статистические связи между состоянием объекта и диагностическими параметрами и требует накопления статистики соответствия диагностических параметров видам технического состояния. Оценка состояния при этом осуществляется с определенной достоверностью. Детерминистский подход, применяемый чаще всего, использует установленные закономерности изменения диагностических параметров, определяющих состояние объекта.

Помимо теории распознавания, в технической диагностике используют также теории контролеспособности. Контролеспособность определяется конструкцией объекта, задается при его проектировании и является свойством объекта обеспечивать возможность достоверной оценки диагностических параметров. Недостаточная достоверность оценки технического состояния является фундаментальной

причиной низкой достоверности распознавания состояния оборудования и оценки его остаточного ресурса.

Таким образом, в результате предшествующих исследований устанавливают связи между характеристиками диагностических параметров и состоянием объекта и разрабатывают диагностические алгоритмы (алгоритмы распознавания), представляющие собой последовательность определенных действий, необходимых для постановки диагноза. Диагностические алгоритмы включают также систему диагностических параметров, их эталонные уровни и правила принятия решения о принадлежности объекта к тому или иному виду технического состояния.

Определение вида технического состояния оборудования может производиться как в собранном состоянии, так и после его полной разборки. В период нормальной эксплуатации используют методы безразборной диагностики, как наиболее экономичные. Методы технической диагностики, требующие разборки, обычно применяют при капитальном ремонте оборудования — при дефектации его элементов. Основной проблемой безразборной технической диагностики является оценка состояния оборудования в условиях ограниченной информации.

По способу получения диагностической информации техническую диагностику разделяют на тестовую и функциональную. В тестовой диагностике информацию о техническом состоянии получают в результате воздействия на объект соответствующего теста. Тестовая диагностика основана на использовании различных методов неразрушающего контроля. Контроль при этом осуществляется, как правило, на неработающем оборудовании. Тестовая диагностика может производиться как в собранном, так и в разобранном состоянии. Функциональную диагностику проводят только на работающем оборудовании в собранном состоянии.

Функциональную диагностику в свою очередь подразделяют на вибрационную и параметрическую диагностики. При использовании функциональной параметрической диагностики оценка технического состояния осуществляется по величине функциональных параметров оборудования при его работе, при этом подача целенаправленных тестовых воздействий не требуется. Отклонение этих параметров от их номинального значения (температура, давление, мощность, количество перекачиваемого продукта, КПД и т.д.) свидетельствует об изменении технического состояния элементов объекта, формирующих данный параметр. Контроль функциональных параметров обычно осуществляется в постоянном режиме оперативным обслуживающим персоналом с помощью штатных приборно-измерительных комплексов технологического оборудования. В связи с этим функциональную параметрическую диагностику часто называют оперативной. Способы функциональной параметрической диагностики обычно излагаются в инструкциях и руководствах по эксплуатации соответствующего вида оборудования и в данном пособии специально не рассматриваются.

Вибрационная диагностика бывает двух видов: тестовая и функциональная (см. 2.1). Сущность функциональной вибрационной диагностики заключается в использовании параметров вибрации оборудования при функционировании в рабочих условиях для оценки его технического состояния без разборки. Особенностью функциональной вибрационной диагностики является использование в качестве диагностических не статических параметров типа температуры или давления, а динамических — виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

Помимо отмеченных выше видов диагностики, для оценки состояния оборудования применяют методы разрушающего контроля, предусматривающие частичное разрушение объекта (например, при вырезке проб для установления свойств материалов путем их механических испытаний), а также инструментальный измерительный контроль элементов оборудования при его разборке во время обследования или ремонта. Классификация видов технической диагностики приведена на рис. 1.3.

Системы диагностики различаются уровнем получаемой информации об объекте. В зависимости от решаемой задачи выделяют следующие виды диагностических систем: для разбраковки объектов на исправные и неисправные или для аттестации объектов по классам; поиска и измерения дефектов и повреждений; мониторинга состояния объекта и прогнозирования его остаточного ресурса. Последняя из перечисленных систем является наиболее сложной и применяется для ответственных и дорогостоящих опасных производственных объектов и технологического оборудования. Такие системы, предусматривающие проведение постоянного мониторинга с применением комплекса методов контроля технического состояния, позволяют проводить оперативную корректировку прогнозных оценок опреде-



Рис. 1.3. Классификация видов технической диагностики

ляющих параметров и уточнение остаточного ресурса. В качестве основных методов контроля развития дефектности в комплексных системах мониторинга в настоящее время используют: для емкостного оборудования — акустико-эмиссионный контроль, для машинного — контроль вибрационных параметров.

Современное технологическое оборудование представляет собой сложные технические системы. Обеспечение требуемой надежности таких систем, оцениваемой вероятностью безотказной работы $P(t)$ (см. табл. 1.1), является более проблематичным по сравнению с простыми. Надежность любой технической системы определяется надежностью составляющих ее элементов. В большинстве случаев для сложных систем контроль одного или нескольких элементов малоэффективен, так как остается неизвестным состояние остальных.

Составляющие элементы сложных технических систем могут соединяться между собой последовательным, параллельным или комбинированным способами. При последовательном соединении элементов с вероятностью безотказной работы $P_1, P_2, \dots, P_n$ вероятность безотказной работы системы определяется из выражения

$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i,$$

где P_i — вероятность безотказности i -го элемента.

При параллельном соединении

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)).$$

При комбинированном способе вначале определяют вероятность безотказной работы элементов с параллельным соединением, а затем — с последовательным.

Способ параллельного соединения дублирующих элементов называется *резервированием*. Резервирование позволяет резко повысить надежность сложных технических систем. Например, если в системе перекачки сырой нефти предусмотрены два независимых параллельных насоса с вероятностью безотказной работы $P_1 = P_2 = 0,95$, то вероятность безотказной работы всей системы $P(t) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = 1 - (1 - 0,95)(1 - 0,95) = 0,998$.

Суммарная надежность системы определяется надежностью ее составляющих. Чем больше количество составляющих, из которых состоит система, тем выше должна быть надежность каждой из них. Например, если техническая система состоит из 100 последовательно соединенных элементов с одинаково высокой вероятностью безотказной работы 0,99, то общая ее надежность будет равна $0,99^{100}$, что составит около 0,37, т. е. вероятность безотказной работы системы в течение заданного времени t составляет только 37 %. В связи с этим при диагностировании сложных систем, прежде всего включающих

большое число составляющих без резервирования, для получения достоверной оценки их надежности необходимо осуществлять сплошной контроль всех составляющих.

Состояние технической системы может описываться множеством параметров. При диагностировании сложных систем, работоспособность которых характеризуется большим числом параметров, возникает ряд дополнительных проблем, а именно:

- необходимо установить номенклатуру основных диагностических параметров, характеризующих работоспособность системы, и задать технические средства их контроля;
- по совокупности этих параметров необходимо разработать алгоритм оценки технического состояния системы и соответствующие программные продукты для ЭВМ.

При проведении диагностики применяют сплошной и выборочный контроль. Крайне важным фактором является то, что применение современных неразрушающих методов позволяет перейти к сплошному контролю. Для сложного технологического оборудования, состоящего из большого числа зависимых элементов, введение сплошного неразрушающего контроля является необходимым условием достоверной оценки его технического состояния.

Диагностика требует определенных затрат, которые растут по мере повышения требований к надежности и безопасности. Для сравнения: в атомной промышленности США затраты на дефектоскопию составляют до 25 % всех эксплуатационных затрат, в России — около 4 %. По данным ВНИКТИнефтехимоборудования, затраты на диагностику нефтехимического оборудования в США составляют около 6 % эксплуатационных затрат, в России — менее 1 %. Вместе с тем эта статья расходов оправдана, так как использование систем технического диагностирования позволяет эксплуатировать каждый экземпляр технологического оборудования до предельного состояния и за счет этого получить значимый экономический эффект.

1.5. Типовая программа технического диагностирования

Типовая программа (типовой алгоритм) технического диагностирования состоит из наиболее общих этапов работ, присущих различным типам диагностируемых объектов. Перечень и последовательность выполнения таких этапов приведены на рис. 1.4.

Первый этап технического диагностирования включает анализ эксплуатационно-технической документации и данных оперативной диагностики. Этот этап является предварительным и позволяет получить ретроспективную информацию об объекте диагностирования, определить соответствие проекту использованных материалов и фактического конструктивного исполнения, фактических условий экс-



Рис. 1.4. Алгоритм технического диагностирования

плуатации (нагрузок, температур, рабочих сред и др.) проектным, выбрать определяющие параметры технического состояния, предварительно установить ожидаемые деградационные процессы, составить перечень элементов и участков объекта диагностирования, которые в наибольшей степени предрасположены к появлению повреждений и дефектов. Анализуются нормативно-техническая, проектная, монтажная и ремонтно-эксплуатационная документация, заключения экспертиз промышленной безопасности, проведенных ранее, а также научно-техническая информация по отказам и повреждениям аналогичных объектов.

Натурное обследование объекта осуществляют в несколько последовательных этапов. В первую очередь проводят визуально-измерительный контроль, измерение геометрических параметров объекта и размеров выявленных дефектов. На объектах, имеющих большие габаритные размеры, выполняют геодезическую съемку. Результа-

том этого этапа является выявление изменения геометрии объекта, наличия поверхностных видимых дефектов и уточнение объема неразрушающего контроля. Далее неразрушающими методами выполняют толщинометрию и дефектоскопию элементов и участков объекта, выявленных на предварительном этапе диагностирования и уточненных при визуальном контроле. При необходимости производят исследование структуры, определение химического состава и механических свойств материалов.

В большинстве случаев натурное обследование завершают испытанием объекта под нагрузкой на прочность, устойчивость и герметичность. Испытаниям предшествуют соответствующие проверочные расчеты с учетом выявленных дефектов. Проверочные расчеты в соответствии с нормативной документацией (ГОСТ 14249–89, 25859–83, 26202–84, 24755–89, РД 03-421–01, ПБ 03-605–03 и др.) выполняют по допускаемым напряжениям с учетом коэффициентов запаса. Величина запаса определяется физико-механическими характеристиками материала конструкции и условиями ее нагружения. Расчет фактических напряжений при проверке их соответствия допускаемым значениям и определении коэффициентов запаса можно заменить определением этих напряжений с помощью номограмм по величине коэрцитивной силы (см. 7.7 и 12.5).

Оборудование считают работоспособным, если его несущие элементы имеют запасы прочности выше следующих нормативных значений:

$n_r = 1,5$ — запас прочности до образования пластического шарнира (по пределу текучести);

$n_b = 2,4$ — запас прочности по пределу прочности;

$n_k = 2,0$ — запас прочности по критическому коэффициенту интенсивности напряжений.

Если расчетный коэффициент запаса ниже установленных значений, то принимают решение о снижении рабочих параметров диагностируемого оборудования (давления, температуры, расхода) или выводе его из эксплуатации.

На завершающем этапе диагностирования выполняют анализ выявленных дефектов и повреждений, их соответствие нормам и критериям, установленным в нормативно-технической документации, дают оценку технического состояния объекта. Выясняют необходимость проведения дополнительных исследований с целью уточнения определяющих параметров на основе уточнения напряженно-деформированного состояния, деградиационных процессов и фактических характеристик материалов.

При признании объекта работоспособным, а также при наличии возможности восстановления его работоспособности выполняют прогнозный расчет остаточного ресурса по определяющим параметрам технического состояния с учетом скорости роста соответствующих дефектов и повреждений.

По результатам технического диагностирования принимают решение о возможности и условиях дальнейшей эксплуатации объекта:

продолжении эксплуатации на рабочих или сниженных параметрах, необходимости ремонта объекта или демонтажа из-за невозможности или нецелесообразности его дальнейшего использования.

В зависимости от конструктивного исполнения в типовую программу диагностирования вносят изменения и дополнения, учитывающие особенности конкретного объекта и предусматривающие проведение дополнительных исследований и применение различных методов неразрушающего контроля: например, контроль состояния магистральных трубопроводов с помощью специальных приборов-дефектоскопов, инструментальное обследование состояния оснований и опор, тепловизионное обследование в режиме эксплуатации объектов с теплоизоляционным покрытием (например, изотермических резервуаров для хранения сжиженного газа), дополнительное обследование фундамента ГПА и конструкций зданий насосных и компрессорных станций и др.

1.6. Виды неразрушающего контроля, его стандартизация и метрологическое обеспечение

Типовая программа диагностики предусматривает использование различных методов контроля, прежде всего методов неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль требует применения специальных и дорогостоящих приборов и оборудования и привлечения высококвалифицированных аттестованных специалистов. Он может осуществляться как дискретно, так и путем постоянного мониторинга на сложных и дорогостоящих опасных производственных объектах.

Для получения информации в неразрушающем контроле (далее НК) используют все виды физических полей и излучений, химических взаимодействий и процессов. Зарождение НК обычно относят ко времени открытия в ноябре 1895 г. рентгеновских лучей, которые позволили обнаружить металлический предмет в закрытой деревянной коробке. За прошедший после этого период разработано большое число различных видов и методов НК.

Классификация видов НК в соответствии с ГОСТ 18353–79 основана на физических процессах взаимодействия поля или вещества с объектом контроля. В основе решения диагностических задач лежит прежде всего оптимальный выбор физического процесса, дающего наиболее объективную информацию об объекте диагностирования. В зависимости от общности физических принципов, на которых они основаны, различают девять видов НК: акустический, магнитный, тепловой, электрический, оптический, вихретоковый, радиационный, проникающими веществами и радиоволновой. Каждый из видов НК подразделяют на методы, отличающиеся следующими признаками:

- характером взаимодействия поля или вещества с объектом, определяющим соответствующие изменения поля или состояния вещества;

- параметром поля или вещества (первичным информативным параметром), измеряемым в процессе контроля;

- способом измерения параметра поля или вещества.

Классификация методов НК по ГОСТ 18353–79 приведена в табл. 1.2 и 1.3. Ни один из методов НК не является универсальным. Каждый из них может быть использован наиболее эффективно для обнаружения определенных дефектов в заданных условиях. Например, многие из методов применимы для контроля некоторых типов материалов: радиоволновые — для радиопрозрачных диэлектрических материалов; электроемкостный — для неметаллических, плохо проводящих ток материалов; вихретоковый, электропотенциальный — для хороших электропроводников; магнитный — для ферромагнетиков; акустический — для материалов, обладающих небольшим затуханием звука соответствующей частоты, и т.д.

Таблица 1.2

Вид контроля	Классификация методов неразрушающего контроля		
	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы Намагниченности Остаточной индукции Магнитной проницаемости Напряженности Эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый Индукционный Феррозондовый Эффект Холла Магнитографический Пондеромоторный Магниторезисторный
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический	Электропотенциальный Электроемкостный	Электростатический порошковый Электропараметрический Электронскровой Рекомбинационного излучения Экзоэлектронной эмиссии Шумовой Контактной разности потенциалов
Вихретоковый	Прошедшего излучения Отраженного излучения	Амплитудный Фазовый Частотный Спектральный Многочастотный	Трансформаторный Параметрический

Вид контроля	Классификация методов неразрушающего контроля		
	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Радиоволновой	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Резонансный	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический	Детекторный (диодный) Болометрический Термисторный Интерференционный Голографический Жидких кристаллов Термобумаг Термолюминофоров Фотоуправляемых полупроводниковых пластин Калориметрический
Тепловой	Тепловой контактный Конвективный Собственного излучения	Термометрический Теплометрический	Пирометрический Жидких кристаллов Термокрасок Термобумаг Термолюминофоров Термозависимых параметров Оптический интерференционный Калориметрический
Оптический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Индукцированного излучения	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Поляризационный Геометрический Спектральный	Интерференционный Нефелометрический Голографический Рефрактометрический Рефлексометрический Визуально-оптический
Радиационный	Прошедшего излучения Рассеянного излучения Активационного анализа Характеристического излучения Автоэмиссионный	Плотности потока энергии Спектральный	Сцинтилляционный Ионизационный Вторичных электронов Радиографический Радиоскопический
Акустический	Прошедшего излучения Отраженного излучения (эхо-метод) Резонансный Импедансный Свободных колебаний Акустико-эмиссионный	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический Электромагнитно-акустический Микрофонный Порошковый

Таблица 1.3

Классификация методов контроля проникающими веществами (капиллярными и течениями)		
По характеру взаимодействия веществ с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Молекулярный	Жидкостный Газовый	Яркостный (ахроматический) Цветной (хроматический) Люминесцентный Люминесцентно-цветной Фильтрующих частиц Масс-спектрометрический Пузырьковый Манометрический Галогенный Радиоактивный Катарометрический Химический Остаточных устойчивых деформаций Акустический

Чувствительность соответствующего метода НК оценивается наименьшими размерами выявляемых дефектов: для поверхностных — шириной раскрытия на поверхности детали, а также протяженностью и глубиной развития; для скрытых — размерами дефекта и глубиной его залегания. Сопоставление различных методов контроля можно проводить только в тех условиях, когда возможно применение нескольких методов. Перечень рекомендуемых методов НК приводится в нормативно-технических документах по технической диагностике конкретных объектов.

Для обеспечения единообразия проведения контроля в различных условиях, единства и требуемой точности получаемых результатов разработана система нормативно-технических документов. Она включает ГОСТы, ОСТы, правила и методики контроля. В них регламентируются классификация методов НК, терминология, основные параметры средств контроля, методы и периодичность их метрологической поверки, методика проведения НК, требования к квалификации персонала и др.

Средства неразрушающего контроля разделяют на индикаторные и измерительные. Индикаторными называют средства контроля, не имеющие измерительных узлов и предназначенные лишь для индикации дефектов. Средства контроля, оснащенные измерительными узлами, подлежат периодической метрологической поверке. Периодичность поверки указывается в паспортах средств измерений и обычно составляет один год. Поверке подлежат также контрольные и стандартные образцы, используемые для настройки и проверки средств измерений.

Квалификация специалистов НК устанавливается и подтверждается по результатам соответствующей аттестации. Согласно

ПБ 03-440—02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля», аттестация проводится по следующим видам НК: ультразвуковой (УК); акустико-эмиссионный (АЭ); радиационный (РК); магнитный (МК); вихрековый (ВК); проникающими веществами: капиллярными (ПВК); течеискания (ПВТ); визуальный и измерительный (ВИК); вибродиагностический (ВД); электрический (ЭК); тепловой (ТК); оптический (ОК).

Аттестация специалистов НК в зависимости от их квалификации производится в соответствии с ПБ 03-440—02 по трем уровням. Специалист I уровня квалификации выполняет работы по НК конкретного объекта по утвержденной инструкции под контролем специалиста II или III уровня и не имеет права оценивать полученные результаты. Специалист II уровня, помимо знаний I уровня, разрабатывает технологические инструкции и карты контроля в соответствии с действующими нормативами и методическими документами в области своей аттестации, производит выбор технологии и средств контроля, выдает заключение по результатам контроля, выполненного им самим или под его наблюдением специалистом I уровня.

Специалист III уровня обладает квалификацией, достаточной для руководства любыми операциями по тому методу НК, по которому он аттестован, в том числе: руководит работой персонала I и II уровней, а также выполняет работы, отнесенные к компетенции последних; проверяет и согласовывает технологические документы, разработанные специалистами II уровня квалификации; разрабатывает технологические документы и технологические регламенты по НК; проводит инспекционный контроль работ, выполненных персоналом I и II уровней квалификации.

Специалисты по НК должны проходить периодическую переаттестацию: I и II уровней — через три года, III уровня — через пять лет. В удостоверении каждого специалиста помимо вида НК записывается вид оборудования, к контролю которого он допущен.

Для правильного выбора методов НК необходимо знание их особенностей, областей применения и технологии контроля. Далее рассмотрены основные методы неразрушающего контроля, наиболее часто применяемые в процессе технической диагностики нефтегазового оборудования.

2. МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

2.1. Сущность вибродиагностики и ее основные понятия

Колебания движущихся частей, а также пульсации потока технологической среды создают в трубопроводах, машинном и емкостном оборудовании вибрации. Параметры колебаний, наряду с величиной возмущающих сил, определяются параметрами технического состояния оборудования: наличием зазоров в сопряжениях, деформацией и износом деталей, просадкой фундаментов, нарушением центровки валов, ослаблением креплений и т.д. Поэтому анализ вибрационных колебаний позволяет получить необходимую информацию о состоянии оборудования. Вибрация является интегральным показателем качества конструкции, изготовления и монтажа оборудования, а также изменения его технического состояния при эксплуатации.

Вибрационная диагностика основана на измерении и анализе параметров вибрации диагностируемого оборудования и занимает особое место среди прочих видов диагностики. Наиболее успешно она используется для диагностики вращающегося оборудования, решая более 90% задач определения и прогноза его состояния [15].

По способу получения диагностической информации вибрационная диагностика может относиться как к виду функциональной, так и тестовой диагностики (см. рис. 1.3). Второе направление применяется в основном для оценки колебательных свойств механических систем и конструкций и потери колебательной энергии на резонансных частотах. В качестве тестового воздействия при этом может быть использован ударный импульс или специальные режимы работы, например режимы разгона-выбега вращающихся машин. Учитывая, что методы тестовой вибрационной диагностики используются в основном в процессе ремонта и виброналадки оборудования, в данном учебном пособии они не рассматриваются.

Функциональная вибрационная диагностика осуществляется без дополнительных тестовых воздействий и без нарушения режимов работы оборудования, т. е. при его функционировании. Однако по сравнению с диагностическими сигналами функциональной параметрической диагностики, характеризуемыми только одним или несколькими параметрами (температура, давление, износ, напряжение, ток, мощность, наличие механических частиц в смазке и др.), вибрационные сигналы содержат значительно больший объем диагностической информации. Это общий уровень сигналов, их спектр, амплитуды, частоты и начальные фазы каждой составляющей, соотношение между составляющими и т.д. Обработка и анализ вибраци-

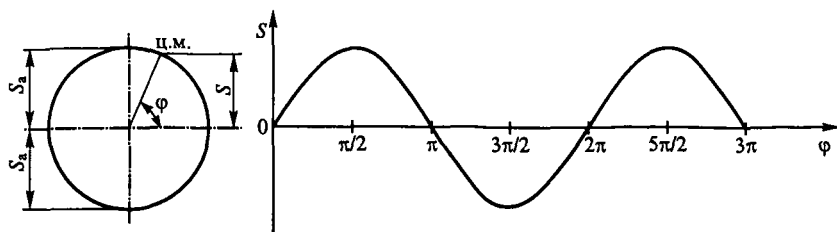


Рис. 2.1. Простейшие гармонические колебания

онных сигналов позволяет эффективно решать задачи глубокой диагностики, определять техническое состояние и прогнозировать состояние и ресурс оборудования.

Посредством вибродиагностики наиболее просто реализуются системы мониторинга состояния оборудования (в первую очередь роторного), позволяющие на раннем этапе обнаруживать и идентифицировать зарождающиеся дефекты, прогнозировать их развитие, перейти на обслуживание и ремонт оборудования по фактическому техническому состоянию.

Вибрация — это механические колебания, характеризующиеся многократно повторяющимся отклонением физических тел от положения равновесия. Эти колебания являются следствием взаимодействия четырех факторов: упругой реакции системы, степени ее демпфирования, силы инерции, характера и величины внешней нагрузки.

Вибрация может характеризоваться следующими основными параметрами: виброперемещением S , виброскоростью v , виброускорением a , угловой скоростью или частотой колебаний ω или f .

Наиболее простым видом вибрации (колебаний) являются гармонические колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется по косинусоидальному или синусоидальному законам, например колебания вращающегося физического тела с неуравновешенным центром масс (ц. м.) в вертикальном направлении (рис. 2.1).

Виброперемещение ц. м. при этом определится из выражения

$$S(t) = S_a \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где $S(t)$ — виброперемещение объекта; S_a — амплитуда виброперемещения; ω — угловая скорость колебаний, с^{-1} ; t — время; φ_0 — начальная фаза колебаний в исходном состоянии при $t = 0$; $\omega t + \varphi_0 = \varphi$ — фаза колебаний.

Фаза колебаний $\omega t + \varphi_0$ определяет состояние колебательного процесса в заданный момент времени t . Периодом колебаний T называется наименьший промежуток времени, через который колеблющаяся система возвращается в исходное состояние. Величина $f = 1/T$ называется частотой колебаний и измеряется числом колеба-

ний в одну секунду (Гц). Частота f и угловая скорость ω связаны между собой соотношением

$$\omega = 2\pi f.$$

Соответственно виброскорость v и виброускорение a определяются по формулам

$$v = dS/dt = S_a \omega \cos(\omega t + \varphi_0) = v_a \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi/2);$$

$$a = dv/dt = d^2S/d^2t = -S_a \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = a_a \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi),$$

где v_a и a_a — амплитуды соответственно виброскорости и виброускорения, $v_a = S_a \omega$; $a_a = v_a \omega = S_a \omega^2$.

Из приведенных выражений следует, что виброскорость относительно виброперемещения имеет опережение фазы на 90° , виброускорение — на 180° .

Широкополосный установившийся вибрационный сигнал реальных машин имеет сложный характер и состоит из ряда гармонических составляющих (гармоник). Каждая из этих составляющих определяется ее частотой, амплитудой и фазой относительно некоторого известного начала отсчета.

Колебания, которые могут быть представлены в виде суммы двух и более гармонических колебаний с разной частотой, называются *полигармоническими*, например

$$S(t) = S_{a1} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + S_{a2} \cos(\omega_2 t + \varphi_2),$$

где S_{a1} , S_{a2} — амплитуды виброперемещений гармонических составляющих соответственно с угловыми частотами ω_1 и ω_2 и начальными фазами φ_1 и φ_2 .

Применяют два основных способа графического изображения вибрационного сигнала: в зависимости от времени или от частоты (угловой скорости) колебаний. Изображение сигнала в зависимости от времени называется временной разверткой. Совокупность частот составляющих гармонических колебаний, расположенных в порядке возрастания амплитуд, называется частотным спектром. Совокупность амплитуд, характеризующих полигармонические колебания и расположенных в порядке возрастания частот, называется амплитудным спектром.

На рис. 2.2, *а*, *б* приведены временные развертки сигналов простейших гармонических колебаний с частотой $f_1 = \omega_1/2\pi$ и $f_2 = \omega_2/2\pi$ и их амплитудные спектры, а на рис. 2.2, *в* — временной сигнал и его спектр, представляющий сумму этих простейших колебаний при $\omega_2 = 2\omega_1$ [15].

В общем случае спектральное представление сложных полигармонических колебаний получают, используя разложение вибрационного сигнала в ряд Фурье. Сигнал при этом представляется в виде

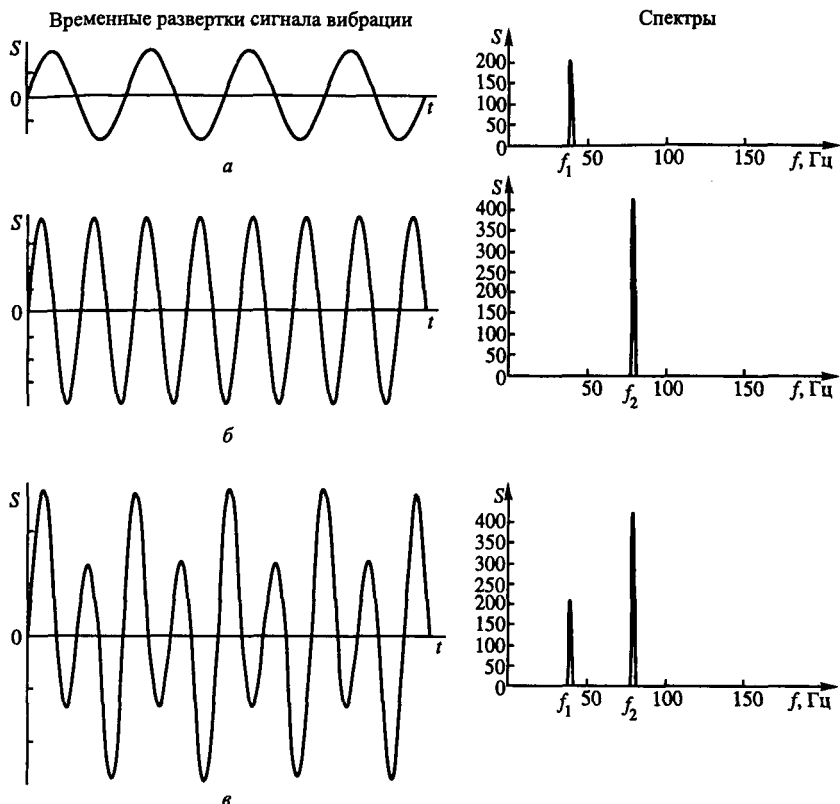


Рис. 2.2. Временные развертки сигналов и их амплитудные спектры

суммы гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте ω , т. е.

$$S(t) = \sum_{i=1}^{\infty} S_{ai} \cos(i\omega t + \varphi_i),$$

где S_{ai} , φ_i — амплитуда и начальная фаза i -й гармонической составляющей виброперемещений, $S_{ai} = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$, $\varphi_i = \arctg(B_i/A_i)$; A_i , B_i — коэффициенты ряда Фурье, определенные по следующим выражениям:

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(i\omega t) dt; \quad B_i = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(i\omega t) dt.$$

Случайный вибрационный сигнал может принимать любое значение в определенном диапазоне. Реальный вибрационный сигнал ма-
30

шины, как правило, представляет собой совокупность гармонических и случайных составляющих, что осложняет его обработку и анализ.

Для стационарных случайных сигналов также можно использовать спектральное представление. Только в этом случае используется не разложение в ряд Фурье, как для периодических сигналов, а интегральное преобразование Фурье

$$S_{(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(w) e^{jw t} dw,$$

где $\psi(w)$ — спектральная плотность, характеризующая распределение энергии по частоте.

Пример временной развертки реального вибрационного сигнала, содержащего гармонические и случайные составляющие, приведен на рис. 2.3 [15].

Сложные полигармонические и гармонические колебания удобно представлять в виде среднеквадратических значений (СКЗ) виброперемещения S_e , виброскорости v_e и виброускорения a_e .

СКЗ параметра вибрации $x_e = S_e, v_e, a_e$, определяется по формуле

$$x_e = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right)},$$

где T — временной интервал, на котором определяется СКЗ; t — время.

Важным параметром является так называемый пик-фактор K — амплитудный коэффициент, значение которого тем больше, чем больше выражен импульсный или случайный характер колебаний:

$$K = \frac{x_{\max}}{x_e}.$$

Для гармонических колебаний $K = \sqrt{2}$, при этом среднее значение параметра гармонической вибрации

$$x_e = \frac{x_a}{\sqrt{2}}.$$

Виброскорость соответствует линейной скорости движения центра масс физического тела в заданном направлении. СКЗ виброскорости определяет импульс силы и кинетическую энергию ($E_k = mv^2/2$) и поэтому исследуется при изучении эффективности вибрационных машин, а также воздействия вибрации на организм человека.

Виброускорение является мерой изменения виброскорости во времени и силовой характеристикой вибрации. По второму закону

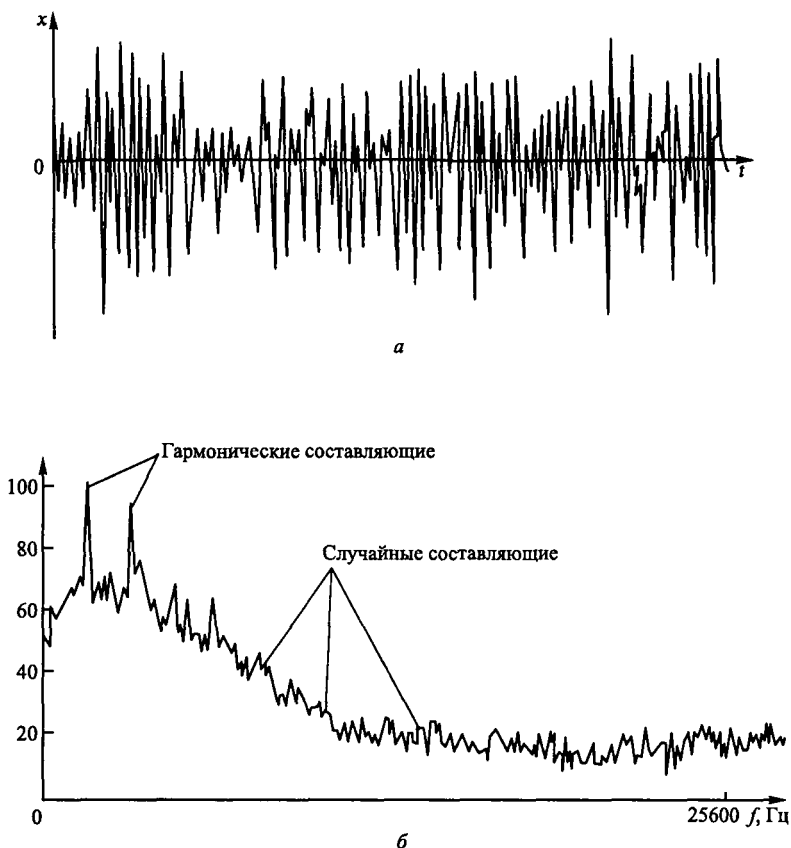


Рис. 2.3. Временная развертка реального сигнала (а) и его спектр (б)

Ньютона произведение массы на ускорение равно силе. То есть сила, действующая на массу, вызывает ее ускорение в направлении своего действия, при этом скорость, а тем более величина перемещения зависят от времени действия силы в данном направлении. С увеличением частоты f период действия силы уменьшается, соответственно уменьшается виброскорость и, тем более, виброперемещение. Поэтому виброускорение целесообразно измерять на высоких частотах, так как его амплитуда пропорциональна квадрату угловой частоты $\omega^2 = (2\pi f)^2$.

Виброперемещение представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение объекта или его деформацию. Виброперемещение при одной и той же мощности уменьшается с ростом ω . Поэтому в низкочастотном диапазоне чаще измеряют параметры виброперемещения и виброскорости, в среднечастот-

ном — виброскорости, а в высокочастотном — виброускорения. Однако такое деление является условным, так как современные микропроцессорные приборы позволяют легко пересчитывать виброперемещение в виброскорость или виброускорение и наоборот.

Вибрация машин может иметь широкий спектр частот от нескольких герц до сотен килогерц. На основе результатов только широкополосных измерений нельзя выявить появление и развитие соответствующего дефекта до того, как увеличивающаяся амплитуда определенной гармоники достигнет величины, способной заметно изменить общий уровень вибрации. Поэтому для удобства измерения и анализа весь частотный диапазон вибрации делят на полосы. Для реализации возможности узкополосного анализа применяют аппаратный или алгоритмический (на основе быстрого преобразования Фурье) методы.

При использовании аппаратного метода из всего частотного диапазона с помощью соответствующих фильтров выделяют полосы частот с относительно постоянной шириной. Применяют декадные, октавные и третьоктавные полосы частот. Верхняя и нижняя граница декадных полос отличается в 10 раз, октавных — в 2 раза, третьоктавных — в 1,26 раза. При разделении частотного диапазона на полосы результаты измерения относят к среднегеометрическим частотам f , которые для октавных полос находят из выражения

$$f = \sqrt{f_n f_v} = \sqrt{2 f_n^2}.$$

Графическое представление среднеквадратического значения параметра вибрации в октавных или третьоктавных полосах частот называется соответственно октавным или третьоктавным спектром вибрации, изображенным в виде столбчатой гистограммы.

Иногда ширину диапазона измеряют в процентах от частоты середины диапазона. Используют узкополосные спектры с шириной диапазона 1,5; 3; 6 %.

Для выполнения спектрального анализа на основе алгоритмического метода применяют цифровые виброанализаторы, использующие быстрое преобразование Фурье (БПФ). БПФ работает с выборками сигнала, равными по длине 2^n , где n — целое число, принимаемое равным 9...11, т. е. длина выборок равна 512...2048 отсчетам. Все составляющие вибросигнала, попадающие в выборку, приводятся к некоторому среднему значению, отражаемому на спектре.

Преимуществом анализа в полосах частот с относительно постоянной шириной является возможность представления на одном графике широкого частотного диапазона с достаточно узким разрешением на низких частотах. Разрешение в области высоких частот ухудшается при этом с повышением частоты. При использовании БПФ-анализаторов весь частотный диапазон разбивается на полосы с постоянной абсолютной шириной. При этом частотное разрешение постоянно во всем диапазоне.

Линейными единицами измерения виброперемещения, виброскорости и виброускорения в системе СИ соответственно являются м, м/с и м/с².

Параметры вибрации могут изменяться в большом диапазоне (на несколько порядков), поэтому для характеристики их уровня пользуются в основном логарифмической шкалой. Логарифмический уровень параметра вибрации, выраженный в децибелах, определяется по формуле

$$L_x = 20 \lg(x/x_{\text{пор}}),$$

где $x_{\text{пор}}$ — пороговое значение соответствующего параметра.

В соответствии с ИСО-1683 используются следующие пороговые значения механических колебаний:

$$S_{\text{пор}} \sim 10^{-12} \text{ м}; \nu_{\text{пор}} \sim 10^{-9} \text{ м/с}; a_{\text{пор}} \sim 10^{-6} \text{ м/с}^2.$$

Перечисленные пороговые величины приняты по ИСО-1683 таким образом, что числовые значения уровней виброперемещения, виброскорости и виброускорения механических колебаний с синусоидальной формой волны и угловой скоростью $\omega_0 = 1000 \text{ с}^{-1}$ равны друг другу.

Таким образом, абсолютные значения S , ν и a выражают в децибелах относительно их стандартного порогового значения. При сравнении значений механических колебаний достаточно показать лишь разность соответствующих уровней x_1 и x_2 в децибелах. Пример перевода децибел в относительные безразмерные единицы приведен в табл. 9.2.

При выражении вибропараметров в линейных единицах измерений их размерность определяется масштабами соответствующих параметров. Для большинства машинных агрегатов амплитуда виброперемещений составляет величины порядка десятков микрон, а виброскорости — порядка десятков миллиметров в секунду (см., например, табл. 2.1). Поэтому при выражении вибропараметров в линейных единицах виброперемещение принято измерять в микронах (мкм), виброскорость — в мм/с, а виброускорение — в м/с².

2.2. Средства контроля и обработки вибросигналов

Приборно-измерительные комплексы и аппаратура, применяемые для контроля и обработки вибросигналов, отличаются разнообразием конструктивного исполнения и функциональными возможностями. Общими для всех видов аппаратуры является наличие измерительных преобразователей (ИП) для фиксации параметров вибросигналов, электронных блоков регистрации и обработки вибрационных сигналов и средств коммутации датчиков с электронны-

ми блоками. Аппаратура выпускается как одно-, так и многоканальная, стационарная и переносная. Современные переносные приборы выпускаются, как правило, одноканальными и по функциональным возможностям делятся на два класса: приборы-сборщики вибросигналов, позволяющие измерять общий уровень вибрации, записывать, хранить и передавать информацию на компьютер для ее последующей обработки и анализа; приборы, называемые сборщиками-анализаторами, позволяющие дополнительно выполнить анализ формы вибросигнала, его частотный и спектральный анализ с помощью быстрого преобразования Фурье.

Стационарная аппаратура включает базовый компьютер, соединенный линиями связи с ИП, средствами усиления сигналов и преобразования их в цифровую форму. Неотъемлемой частью современных систем вибродиагностики и мониторинга является программное обеспечение для компьютера. Программное обеспечение отличается уровнем сложности и перечнем решаемых задач: сбор, хранение, обработка и анализ информации, выявление и идентификация дефектов, выдача долгосрочного прогноза технического состояния оборудования и др. Самыми сложными являются программы автоматической диагностики, позволяющие наряду с автоматической постановкой диагноза и выдачей прогноза технического состояния оборудования формировать рекомендации по его обслуживанию и ремонту.

Стационарная аппаратура обычно изготавливается многоканальной, позволяющей вести контроль одновременно в ряде характерных точек контролируемого объекта. Для роторных машин большой единичной мощности параллельный многоканальный контроль параметров вибрации в разных (двух-трех) направлениях является обязательным, так как позволяет определить орбиту движения вала в подшипнике (прецессию) и взаимный анализ одновременных спектров. Кроме того, любая система вибрационной диагностики включает в себя датчик оборотов (чаще всего вихретоновый), подключаемый к цифровому входу виброанализатора.

При контроле параметров вибрации используют два метода измерения: кинематический и динамический.

Кинематический метод заключается в том, что измеряют координаты точек объекта относительно выбранной неподвижной системы координат. ИП, основанные на этом методе измерения, называют преобразователями относительной вибрации.

Динамический метод основан на том, что параметры вибрации измеряют относительно искусственной неподвижной системы отсчета. Такие ИП называют преобразователями абсолютной вибрации. Системы измерения вибрации, использующие в качестве искусственной неподвижной системы отсчета инерционный элемент, связанный с объектом через упругий подвес, называют сейсмическими системами.

ИП бывают контактными и бесконтактными, основанными на разных физических явлениях. По принципу работы ИП абсолютной

вибрации разделяют на генераторные и параметрические. Генераторные ИП осуществляют прямое преобразование механической энергии в электрический сигнал. К ним относят пьезоэлектрические, индукционные и др. Источник энергии им не нужен. В параметрических ИП, в отличие от генераторных, происходит изменение соответствующих электрических параметров (сопротивления, емкости, напряжения, индуктивности) под воздействием механических вибрационных колебаний. К параметрическим ИП относят тензорезисторные, емкостные, датчики Холла, индуктивные и др. Параметрическим ИП требуется вспомогательный источник энергии.

Для измерения абсолютной вибрации наибольшее распространение нашли генераторные пьезоэлектрические ИП, обладающие высокой надежностью, большим частотным диапазоном и простым конструктивным исполнением (принцип действия пьезоэлементов рассмотрен в 9.4). Для измерения относительной вибрации, например при определении формы орбиты вала в подшипнике скольжения, обычно используются вихретоковые ИП. Перечисленные выше ИП являются контактными и требуют закрепления на исследуемом объекте. При контроле вибрации в труднодоступных местах, в условиях высоких температур, агрессивных сред, повышенной радиации и других специальных условиях могут применяться бесконтактные измерители относительной вибрации. Чаще применяются лазерные бесконтактные ИП.

Наряду с конструктивными особенностями и местом установки на результаты измерений существенное влияние оказывает способ крепления контактных ИП на контролируемом объекте. Соединение ИП с колеблющейся поверхностью имеет определенную упругость, которая, обладая способностью демпфировать энергию колебаний, изменяет уровень и частотный состав вибрации. Поэтому особенности крепления и места установки ИП особо оговариваются в методиках вибродиагностики соответствующих объектов.

Измерения проводят в контрольных точках на элементах машины, которые в максимальной степени реагируют на динамическое состояние, т.е. в которых регистрируемый вибрационный сигнал имеет наибольшую величину. Как правило, такими элементами являются корпуса подшипников. Полную оценку вибрационного состояния крупных агрегатов получают путем измерения вибропараметров в трех взаимно перпендикулярных направлениях (вертикальном, горизонтальном и осевом). Такую оценку обычно производят в период приемочных испытаний и после динамической балансировки машины. В период эксплуатации чаще ограничиваются измерениями в одном или двух направлениях.

При проведении диагностики необходимо учитывать особенности каждого вида оборудования, обусловленные их виброактивностью. Ниже рассматриваются основные особенности виброактивности и вибродиагностические признаки наиболее общих элементов оборудования.

2.3. Виброактивность роторов

Ротором называется звено, совершающее вращательное движение. Все машины, имеющие роторы, можно разделить на две группы:

- машины с конструктивно неуравновешенными движущимися частями (поршневые компрессоры, поршневые насосы, качалки и др.);

- машины с номинально уравновешенными движущимися частями.

Ко второй группе относится большинство роторных машин. Вместе с тем полностью уравновешенных роторов не бывает.

Для снижения вибрации роторы при их изготовлении стремятся максимально сбалансировать, но из-за неточности изготовления и сборки, неоднородности материала, деформации деталей ротора под нагрузкой и при асимметрии теплового поля, износа подшипниковых узлов всякий ротор имеет некоторую неуравновешенность. Неуравновешенность роторов является главной причиной вибрации роторных машин.

При эксплуатации оборудования силы и моменты сил инерции от неуравновешенности ротора возрастают, так как к остаточным дисбалансам в плоскостях опор после балансировки добавляются технологические и эксплуатационные дисбалансы. Это приводит к необходимости балансировать роторы не только при их изготовлении, но также и в процессе ремонта и виброналадки на предприятиях, эксплуатирующих роторные машины. Так, например, ротор центробежного насоса, предварительно уравновешенный на балансировочном станке, в процессе работы насоса может оказаться по ряду причин гидродинамически неуравновешенным: в частности, из-за различия межлопастных объемов при заполнении их технологической жидкостью.

В общем случае дисбалансы роторов в условиях эксплуатации складываются из трех составляющих:

$$\bar{D}_p = \bar{D}_{\text{ост}} + \sum \bar{D}_{\tau i} + \sum \bar{D}_{\text{э}i} \leq [D],$$

где $\bar{D}_p$ — дисбаланс ротора при установившейся рабочей скорости машины; $\bar{D}_{\text{ост}}$ — дисбаланс ротора после его балансировки на балансировочном станке (остаточный дисбаланс); $\sum \bar{D}_{\tau i}$ — сумма технологических дисбалансов, возникающих при присоединении дополнительных элементов к ротору после его уравновешивания (например, зубчатой передачи); $\sum \bar{D}_{\text{э}i}$ — эксплуатационные дисбалансы, дополнительно возникающие в процессе работы; $[D]$ — предельно допустимый эксплуатационный дисбаланс.

Во время вращения неуравновешенность вызывает переменные нагрузки на опорах ротора и его динамический прогиб. Существуют два основных типа неуравновешенности — статическая и моментная.

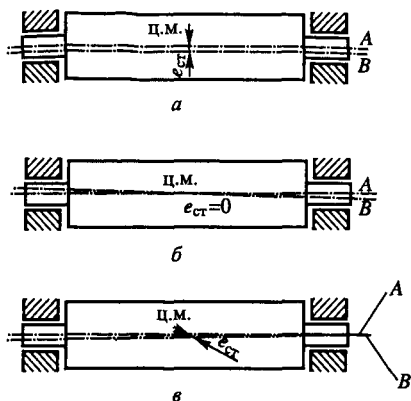


Рис. 2.4. Типы неуравновешенности роторов:

a — статическая; *б* — моментная;
в — динамическая

Их различают по взаимному расположению оси вращения и оси инерции ротора *A*. При статической неуравновешенности ротора (рис. 2.4, *a*) его ось вращения и главная центральная ось инерции *B* параллельны, но находятся на некотором расстоянии $e_{ст}$ друг от друга. При моментной неуравновешенности (рис. 2.4, *б*) оси пересекаются в центре масс ротора, поэтому моментная неуравновешенность не обнаруживается при статической балансировке. Наиболее общий случай, когда на роторе одновременно присутствует статическая и моментная неуравновешенности, называется динамической неуравновешенностью (рис. 2.4, *в*). При динамической неуравновешенности оси инерции и вращения непараллельны и пересекаются или прекрещиваются не в центре масс. Вклад от того или иного типа неуравновешенности определяется следующим правилом: полусумма составляющей вибрации в опорах на частоте вращения ротора определяет вклад от статической неуравновешенности, а полуразность — от моментной.

В зависимости от величины неуравновешенной силы инерции $F_{и}$, возникающей при нормальной работе, машины делятся на четыре категории: малой динамичности, средней, большой и очень большой.

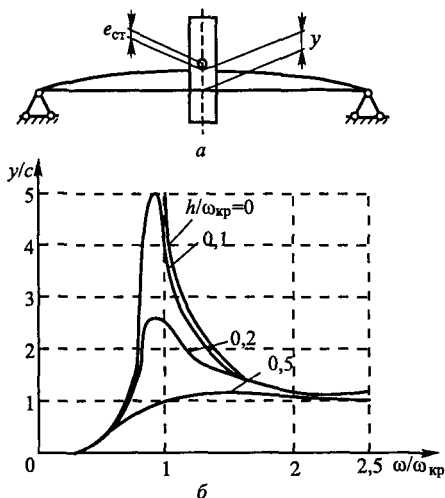
Под действием силы $F_{и}$ ротор в процессе вращения дополнительно получает динамический прогиб y . Закономерность изменения прогиба y у рассмотрим на примере идеализированного одномассового ротора с одной степенью свободы в виде невесомого вала с массивным диском, расположенным посередине между подшипниковыми опорами (рис. 2.5, *a*). Центробежная сила инерции $F_{и}$, действующая на такой ротор, уравновешивается силой его упругости $F_{уп}$:

$$m\omega^2(y + e_{ст}) = cy,$$

где m — масса вращающегося ротора; ω — частота вращения ротора; $e_{ст}$ — смещение оси инерции ротора (центра масс) относительно оси его вращения; c — коэффициент жесткости ротора.

Рис. 2.5. Амплитудно-частотная характеристика однодискового неуравновешенного ротора с различным демпфированием:

а — схема ротора; б — амплитудно-частотная характеристика



Отсюда

$$y = \frac{m\omega^2 e_{ст}}{c - m\omega^2}.$$

Разделив числитель и знаменатель этого выражения на m и приняв $c/m = \omega_{кр}^2$, получим

$$y = \frac{\omega^2 e_{ст}}{\omega_{кр}^2 - \omega^2},$$

где $\omega_{кр} = \sqrt{c/m}$ — критическая (резонансная) частота вращения идеализированного ротора, при которой его динамический прогиб становится значительным (теоретически бесконечным) и может привести к разрушению ротора.

Из анализа последнего выражения следует, что при превышении частотой вращения ротора ω ее критического значения $\omega_{кр}$ динамический прогиб вала уменьшается и его центр масс все больше приближается к оси вращения ротора, т. е. ротор при этом самоцентрируется. Описанное явление широко используется в технике. При этом считается, что относительный прогиб $y/e_{ст}$ близок к допустимому, если удовлетворяются следующие условия: жесткий ротор — $\omega \leq 0,7 \omega_{кр}$; гибкий ротор — $\omega \geq 1,3 \omega_{кр}$.

Реальные роторы представляют собой, как правило, многомассовые системы, связанные между собой и основанием упругими элементами со многими степенями свободы. К жестким роторам принято относить роторы, у которых $\omega \leq \omega_{кр}$, у гибких роторов $\omega \geq 0,4\omega_{кр}$.

Кроме того, реальные конструкции обладают свойством демпфирования (рассеяние энергии) колебаний.

На рис. 2.5, б в качестве примера приведены амплитудно-частотная характеристика однодискового неуравновешенного ротора с различным демпфированием [18]. Амплитуда колебаний ротора резко возрастает при снижении степени демпфирования (при уменьшении логарифмического декремента затухания h). Затухание определяется величиной сил внутреннего трения в материале, сопротивлением в соединениях либо специальным демпфером.

Реальные конструкции роторов, имея распределенные массу и жесткость, могут иметь множество резонансных частот, характеризующихся собственной формой колебаний конструкции. Эти формы представляют собой плоские кривые, вращающиеся вокруг оси ротора. Так, формы колебаний вала равного сечения на абсолютно жестких опорах на критических скоростях выглядят в виде синусоид соответственно с одной, двумя, тремя и т.д. полуволнами [18].

Помимо дисбаланса наиболее часто встречающимися дефектами технологических роторных машин, определяющими их виброактивность, являются: погрешности монтажа соединенных с ротором валов, механическое ослабление крепления элементов роторных машин (люфт), дефекты фундамента, повреждение подшипников качения и скольжения, изгиб роторного вала и др.

Для электрических роторных машин причинами повышенной виброактивности дополнительно являются дефекты электромагнитной системы и качество питающей электрической сети. Наличие и «вклад» таких причин определяются по скачкообразному изменению общего уровня вибрации при отключении электрической машины от сети.

Интегральной характеристикой технического состояния технологических роторных машин, диагностическим признаком ряда дефектов, возникающих при монтаже и эксплуатации, является обратная (роторная) вибрация. Обратной называется вибрация с частотой, равной частоте вращения ротора. Обратная гармоническая составляющая вибрации в роторных машинах является преобладающей.

Вибрация ротора передается на подшипники и может быть обнаружена в любой их точке. Измерение вибропараметров (амплитудного или пикового значений виброперемещений и (или) среднего квадратического значения виброскоростей в октавных полосах частот корпусов подшипниковых узлов) производится в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Измеренные параметры сопоставляются с допустимыми значениями.

Допустимый уровень вибрации для машин разных классов по ГОСТ ИСО 10816-4—99 приведен в табл. 2.1. В качестве основного вибропараметра по ГОСТ ИСО 10816-4—99 принято среднеквадратическое значение виброскорости, поскольку этот параметр наиболее полно характеризует энергию колебательного процесса. Максимальное значение виброскорости, называемое чаще интенсивностью вибрации, является показателем опасности вибрации. Если виброскорость превышает допустимое значение, то следует идентифицировать дефект с целью его устранения.

Таблица 2.1

Среднеквадратическая виброскорость, мм/с	Уровень вибрации для машин различных классов по ГОСТ ИСО 10816-4—97			
	I (малые)	II (средние)	III (большие на жестком основании)	IV (большие на упругом основании)
0,28	Хорошо			
0,45				
0,71				
1,12				
1,8	Удовлетворительно			
2,8				
4,5				
7,1	Неудовлетворительно			
11,2				
18				
28				
45	Неприемлемо			

Примечание. Класс I — машина с мощностью привода до 15 кВт. Класс II — машина с мощностью привода 15...875 кВт без специального фундамента или до 300 кВт на специальном фундаменте. Класс III — большая машина с вращающимся ротором, смонтированная на мощном фундаменте, который обладает жесткостью в направлении измерения вибраций. Класс IV — большая машина с вращающимся ротором, смонтированная на фундаменте, который обладает малой жесткостью в направлении измерения вибраций. Упругое основание — собственная частота машины+опоры меньше частоты вращения. Жесткое основание — собственная частота машины+опоры больше частоты вращения.

Рассмотрим простейшие вибродиагностические признаки некоторых дефектов роторных машин. Дисбаланс проявляет себя в виде большой амплитуды на оборотной частоте вращения (1х). Амплитуда дисбаланса резко возрастает с увеличением скорости вращения, соответственно увеличивается и частота вибрации.

Дефекты фундамента обнаруживаются за счет разницы величины вибросигнала в разных направлениях. Поскольку машина вследствие установки на фундаменте более податлива в горизонтальном направлении, вибрация в горизонтальном направлении превышает вибрацию в вертикальном. При снижении жесткости фундамента за счет возникновения дефектов амплитуда оборотной частоты ротора увеличивается. Но в отличие от «чистого дисбаланса» рост амплитуды оборотной гармоники происходит только в одном из направлений, а именно в направлении максимального снижения жесткости фундамента.

Соответственно погрешности монтажа соединяемых с ротором валов выявляются следующим образом. Наличие угловой погрешности приводит к увеличению амплитуды на оборотной частоте вращения. Радиальная погрешность повышает вибрацию на двойной час-

тоте вращения ($2\times$). Если при этом пик на частоте $2\times$ составляет менее 50 % от пика $1\times$, то погрешность небольшая, от 50 % до 150 % — значительная. При превышении пика $2\times$ более 150 % от пика $1\times$ необходима срочная выверка валов и устранение погрешностей монтажа. При большой радиальной погрешности монтажа в спектре могут присутствовать гармоники $3\times\dots 10\times$.

Для некоторых роторных машин, например с гибким ротором, измерение вибрации на неподвижных корпусах подшипников может оказаться недостаточным. В этих случаях осуществляют также измерение вибрации вращающихся роторов. Кроме того, для машин большой мощности используют анализ траектории (прецессии) движения вала в подшипнике.

Помимо измерения виброскорости для машин, работающих в низкочастотном диапазоне (ниже f_x по ГОСТ ИСО 10816-4—99), проводят измерения виброперемещения; для машин, работающих в высокочастотном диапазоне (выше f_y по ГОСТ ИСО 10816-4—99), проводят измерения виброускорения. В общем случае вибрацию машины можно считать допустимой, если она не превышает допустимые значения по всем вибропараметрам (перемещения, скорости и ускорения).

2.4. Виброактивность подшипников и их диагностика

Причинами колебаний, возникающих в подшипниках скольжения, являются наличие обязательного бокового зазора между подшипником и цапфой вала, а также наличие динамических сил в пульсирующем потоке смазочной жидкости в зазоре, определяемых гидродинамическими свойствами смазки и толщиной смазочного слоя. В связи с этим подшипники скольжения являются сложным объектом для вибродиагностики. Эталонный спектр колебаний бездефектных подшипников скольжения не имеет характеристических частот и устанавливается экспериментально. В дальнейшем развивающиеся дефекты диагностируются по изменению спектральных составляющих. Дополнительно эффективным методом оценки состояния подшипников скольжения является также анализ формы траектории движения вала. Форма траектории зависит от многих факторов, в том числе от количества и качества смазки, наличия дефектов подшипника и вала. При отсутствии дефектов траектория обычно представляет собой замкнутый эллипс, что связано с различной жесткостью подшипника в вертикальном и горизонтальном направлениях. Анализ отклонения от эталонной формы траектории позволяет определить наличие и качество смазки, обнаружить дисбаланс ротора, выявить основные дефекты подшипника и оценить степень их опасности.

Источниками вибрации в подшипниках качения являются их кинематические особенности, дефекты и повреждения. При каждом перекачивании тел качения по дефектам и неровностям эти источ-

ники генерируют импульсы соответствующей частоты, совокупность которых образует сигнал колебаний. К основным дефектам изготовления относятся овальность и волнистость дорожек качения, ограниченность тел качения и дисперсия их размеров, неравномерный радиальный зазор между кольцами и телом качения. Ось вала в подшипнике с зазором блуждает (совершает прецессию), при этом происходит столкновение с телом качения, являющееся причиной импульсных колебаний.

Подшипники качения устанавливаются обычно с гарантированным радиальным зазором. При этом радиальная жесткость подшипника периодически изменяется из-за того, что внутреннее кольцо опирается поочередно на четное и нечетное число тел качения. Периодические составляющие радиальной жесткости могут достигнуть 25 % от среднего значения.

Частота периодической составляющей изменения жесткости равна zf_c , где z — число тел качения; f_c — частота вращения сепаратора относительно неподвижного наружного кольца:

$$f_c = f_b \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) 1/2,$$

где f_b — частота вращения внутреннего кольца подшипника (вала), Гц, $f_b = n/60$; n — число оборотов вала, об/мин; d — диаметр тел качения, мм; D — диаметр окружности, проходящей через центры тел качения (средний диаметр сепаратора подшипника), мм; β — угол контакта тел качения в подшипнике.

Эта же частота и ее кратные гармоники будут соответствовать наличию единичного дефекта на наружном кольце подшипника при перекатывании по нему тел качения:

$$f_{н.к} = zf_c = \frac{z}{2} \frac{n}{60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right).$$

Аналогично при перекатывании тел качения по внутреннему кольцу частота, соответствующая повреждению внутреннего кольца:

$$\begin{aligned} f_{в.к} &= z(f_b - f_c) = z \left[\frac{n}{60} - \frac{n}{2 \cdot 60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \right] = \\ &= \frac{zn}{60} \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{d}{2D} \cos \beta\right) = \frac{z}{2} \frac{n}{60} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right). \end{aligned}$$

Частота, соответствующая повреждению тел качения при их вращении, определяется по формуле

$$f_{т.к} = \frac{D}{2d} \frac{n}{60} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \beta\right).$$

Наибольшее применение в настоящее время нашли следующие четыре метода виброакустической диагностики подшипников качения: по общему уровню (OL) вибрационного сигнала (по амплитуде виброперемещения или виброскорости); по спектральному анализу вибросигнала (автоспектру — AS); по методу ударных импульсов (SPM); по спектральному анализу огибающей высокочастотной вибрации (ES). В современных программах автоматической диагностики подшипников для повышения достоверности постановки диагноза, как правило, используется комбинация методов OL, AS и ES.

Диагностика по общему уровню вибросигнала (OL) является наименее информативной, осуществляется в низкочастотной области и позволяет выявить только сильно развитые дефекты в предаварийном состоянии подшипника. Несмотря на недостатки, метод из-за своей простоты продолжает использоваться в системах защитного мониторинга.

Анализ автоспектра (AS) вибросигнала позволяет выявить наличие и интенсивность пиков на характеристических частотах подшипников и таким образом идентифицировать дефект и определить степень его развития. Как отмечалось выше, для каждого подшипника помимо частоты вращения имеется четыре характеристических частоты — наружного кольца, внутреннего кольца, тела качения и сепаратора. При анализе дефектов подшипника необходимо проводить исследование спектра на наличие и интенсивность пиков на характеристических частотах подшипников и их гармониках. Эти пики являются безусловным признаком дефекта. Вместе с тем автоспектр сложно поддается расшифровке и анализу из-за наличия большого числа источников вибрации, не имеющих отношения к подшипнику качения; наличие механических резонансов требует значительного времени для усреднения результатов и др.

Как уже отмечалось, даже идеальные подшипники качения являются виброактивными из-за параметрических и кинематических воздействий. Они возбуждают так называемую фоновую высокочастотную вибрацию, мощность которой постоянна во времени. При появлении дефектов, например внешнего кольца, появляются спектральные амплитуды (ударные импульсы) на участках, кратных частоте возбуждения. Эти ударные импульсы накладываются на фоновую вибрацию в виде пиков, затухающих во времени. При хорошем техническом состоянии подшипников пики превышают уровень фона незначительно. Сам уровень фона также невысок. Отношение пикового и среднеквадратического значений общего уровня фона, которое называется пик-фактором, является диагностическим признаком, а метод, основанный на измерении пик-фактора на частоте 31,5...32,5 кГц, называется методом ударных импульсов (SPM). Принцип действия ударных импульсов поясняется на рис. 2.6, где представлены временные высокочастотные сигналы вибрации исправного подшипника качения и подшипника с раковинной поверхностью качения [15]. Сигнал при наличии дефекта приобретает модулированную форму.

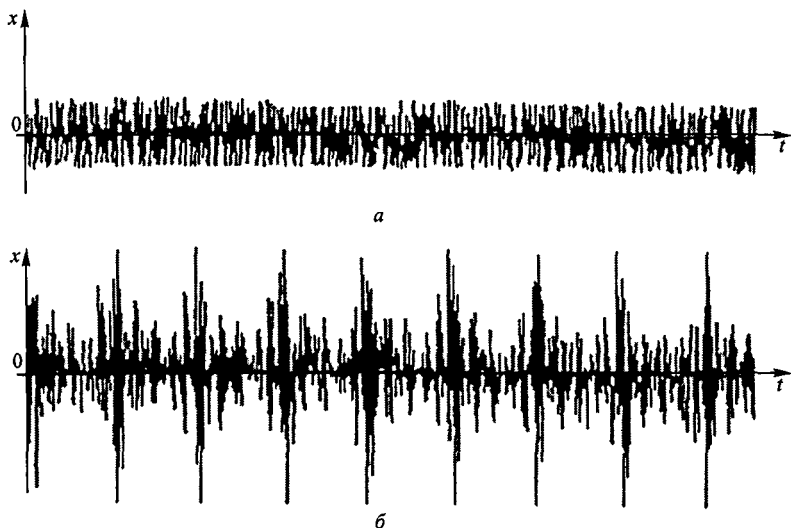


Рис. 2.6. Высокочастотная вибрация исправного (а) и дефектного (б) подшипников качения

С ростом дефекта ударные импульсы возрастают, величина пик-фактора возрастает максимально и достигает значения десяти и более. Далее пиковое значение импульса растет незначительно, но при расширении зоны распространения дефекта растет уровень фоновой вибрации. В предаварийном состоянии уровень фоновой вибрации становится соизмерим с уровнем пиков, так как вся фоновая вибрация при развитом и распространенном дефекте состоит из системы пиков. Величина пик-фактора при этом снижается.

Достоинствами метода SPM являются высокая чувствительность к зарождающимся дефектам, быстрое действие и простота измерений. Вместе с тем метод не позволяет идентифицировать вид зарождающегося дефекта. Приборы, в которых реализован метод SPM, являются по существу контрольными приборами со светофорной сигнализацией: при исправном подшипнике и величине пик-фактора от 3 до 5 высвечивается зеленая зона, при зарождающемся дефекте и пик-факторе свыше 5 до 15 — желтая зона и при развитом дефекте с пик-фактором свыше 15 до 25 — красная зона. Кроме того, метод SPM перестает работать при наличии цепочки развитых дефектов, не чувствителен к дефектам сборки и не может быть использован для низкооборотных машин.

Наиболее информативным является метод ES, где вся информация о техническом состоянии подшипника содержится в огибающей высокочастотного сигнала. Частота модуляции высокочастотного сигнала определяет вид дефекта, а глубина модуляции — степень его развития. Помимо частоты модуляции, являющейся основным при-

знаком дефекта, используется еще и ряд дополнительных признаков. В качестве примера в табл. 2.2 приведены основные и дополнительные диагностические признаки в спектре огибающей высокочастотной вибрации некоторых дефектов подшипников качения [15].

Таблица 2.2

Вид дефекта	Частоты основных признаков	Частоты дополнительных признаков
Неоднородный радиальный натяг	$2f_{\text{в}}$	$2if_{\text{в}}$, нет роста ВЧ
Перекус наружного кольца	$2f_{\text{н.к}}$	$2if_{\text{н.к}}$, нет роста ВЧ
Износ наружного кольца	$f_{\text{н.к}}$	$if_{\text{н.к}}$, $i \leq 3$, рост ВЧ
Раковины, трещины на наружном кольце	$if_{\text{н.к}}$, $i > 3$	Рост ВЧ
Износ внутреннего кольца	$if_{\text{в}}$	$f_{\text{в}}$, рост ВЧ
Раковины, трещины на внутреннем кольце	$if_{\text{в.к}} \pm i_2 f_{\text{в}}$	$if_{\text{в}}$, рост ВЧ
Износ тел качения и сепаратора	$f_{\text{с}}$, $(f_{\text{в}} - f_{\text{с}})$	$if_{\text{с}}$, $i(f_{\text{в}} - f_{\text{с}})$, рост ВЧ
Раковины, сколы на телах качения	$2i_1 f_{\text{т.к}} \pm i_2 f_{\text{с}}$	$i_1 f_{\text{т.к}} \pm i_2 f_{\text{с}}$, рост ВЧ

Примечание. $f_{\text{в}}$ — частота вращения вала; $f_{\text{н.к}}$ — частота перекатывания тел качения по наружному кольцу; $f_{\text{в.к}}$ — то же, по внутреннему; $f_{\text{т.к}}$ — частота вращения тел качения; $f_{\text{с}}$ — частота вращения сепаратора; ВЧ — высокочастотная область спектра вибрации; $i = 1, \dots, n$.

Таким образом, достоинствами ЕС наряду с высокой чувствительностью является возможность идентификации вида дефекта по частоте модуляции и степени его развития по относительной глубине модуляции. При этом абсолютный уровень вибросигнала не имеет принципиального значения в связи с переходом на относительные измерения. Эталонным признаком бездефектного подшипника является отсутствие в спектре огибающей гармонических составляющих. Важнейшим достоинством ЕС высокочастотного сигнала является также то, что диагностике подвергается только тот подшипник, на котором установлены датчики. К числу основных недостатков ЕС следует отнести то, что данный метод перестает работать при развитых дефектах и в предаварийном состоянии. Кроме того, требуется достаточно большое время измерений для усреднения результатов.

2.5. Виброактивность зубчатых передач и трубопроводов

Зубчатые передачи являются одним из наиболее виброактивных элементов машин [9]. Даже идеальные зубчатые передачи возбуждают параметрическую вибрацию из-за периодического изменения

жесткости зубьев по длине зацепления и из-за пересопряжения зацепления с нечетного на четное число пар зубьев (в прямозубых передачах с однопарного на двухпарное зацепление). Периодическое изменение жесткости зубьев возбуждает колебания на зубцовой частоте и ее гармониках:

$$f = i f_z = i f_1 z_1 = i f_2 z_2,$$

где i — порядковый номер гармоники; f_z — зубцовая частота, Гц; f_1 и f_2 — частота вращения соответственно ведущего и ведомого зубчатых колес, Гц; z_1 и z_2 — число зубьев ведущего и ведомого зубчатых колес.

На величину вибропараметров на зубцовой частоте и ее гармониках влияют как погрешности изготовления (неравномерность бокового зазора, непостоянство толщин зубьев и др.), так и степень износа профиля зубьев при эксплуатации, наличие усталостного выкрашивания рабочих поверхностей и т.д., приводящих к изменению условий нагружения по линии зацепления. Кроме того, при выходе зубьев из зацепления возможно возникновение отрывных динамических колебаний, что приводит к появлению спектральных составляющих в широком частотном диапазоне, в том числе в диапазоне частот колебаний роторов, корпусов подшипников, зубчатых колес и других элементов машин.

Таким образом, даже идеальная (без дефектов) зубчатая передача обладает высокой виброактивностью, спектр которой занимает широкую полосу частот и имеет сложный характер. Вместе с тем основные составляющие вибрации зубчатых передач, позволяющие осуществлять их практическую диагностику, укладываются в три гармонических ряда с частотами, кратными зубцовой частоте if_z , а также частоте вращения ведущего if_1 и ведомого if_2 валов передачи.

Причинами возникновения вибрации в промышленных и магистральных трубопроводах, в отличие от роторных машин, является пульсация давления перекачиваемой технологической среды. Частота собственных колебаний трубопроводов $f_{тр}$ определяется целым рядом факторов: геометрией трубопроводов (наличием вертикальных, наклонных и горизонтальных участков), диаметром и толщиной стенки трубы, расстоянием между опорами и способом закрепления (защемления) трубопровода на опорах, наличием сосредоточенных масс на различных участках трубопровода (затворов, клинкетов и т.п.). В настоящее время разработаны мощные вычислительные программные средства, позволяющие рассчитывать $f_{тр}$ с учетом всех возможных влияющих факторов. С течением времени величина $f_{тр}$ может меняться из-за различных причин: отложения парафинов из нефти, скопления газового конденсата на низких участках газопроводов, износа трубопроводов, сезонных колебаний грунтов, просадки опор и др.

Для предупреждения преждевременного разрушения трубопроводов необходимо в самом первом приближении соблюдать условие,

чтобы отношение частоты возмущающего импульса главной гармоники $f_{\text{возм}}$ к частоте свободных колебаний трубопроводов $f_{\text{тр}}$ соответствовало условиям $f_{\text{возм}}/f_{\text{тр}} < 0,75$ или $f_{\text{возм}}/f_{\text{тр}} > 1,3$.

Пульсация давления технологической среды, вызывающая вибрацию трубопроводов, обуславливается рядом причин. Наиболее частой причиной пульсации давления являются колебания технологической среды, возмущаемые работой поршневого или роторно-лопаточного агрегата нагнетателя. Причинами вибрации могут быть также автоколебания трубопроводной обвязки нагнетателей, возникающие при определенных условиях при прокачке технологической среды через неоднородности обвязки. Пульсация давления может возникать и в линейной части трубопроводов из-за турбулизации потока технологической среды на стенках труб и различных неоднородностях (отводах, трубопроводной арматуре и др.).

Вибрация трубопроводов изменяет их напряженное состояние. В дополнение к действующим статическим нагрузкам (весовым, температурным, нагрузкам от внутреннего давления и монтажных натягов) при вибрации возникают циклические напряжения, величина которых определяется амплитудой виброперемещений и формой изгибных колебаний трубопровода. Современные программные средства расчета позволяют определять виброперемещения трубопроводов с учетом их реальных характеристик (геометрических размеров, условий закрепления на опорах, наличия сосредоточенных масс, конструкции стыков и др.) и на этой основе устанавливать допустимое значение амплитуды виброперемещений исходя из условия, что фактические напряжения не будут превышать предел выносливости материала трубопровода. Таким средством является, например универсальный программно-вычислительный комплекс ANSYS (США), разработанный на основе метода конечных элементов (МКЭ) и нашедший наиболее широкое распространение. Могут применяться и другие коммерческие универсальные МКЭ-программы (ABAQUS, LS-DYNA, MARC и др.).

2.6. Вибродиагностика и вибромониторинг общих дефектов машинного оборудования

Реальный механический агрегат представляет собой сложную систему масс, упругих связей и демпфирующих (поглощающих колебательную энергию) элементов. Причинами его вибраций являются:

- начальная неуравновешенность движущихся частей и ее изменение в процессе эксплуатации. Вибрации отличаются низкой частотой и большими амплитудами;
- соударения деталей машин, обусловленные кинематическими особенностями сопряжений, наличием в них зазоров, увеличивающихся при износе, и появляющихся со временем дефектов. Вибра-

ции характеризуются высокими частотами, малыми амплитудами и значительными ускорениями;

- трение в кинематических парах. Вибрации имеют место в широком диапазоне частот, имеют малую амплитуду, создавая фоновый шум акустического сигнала от соударения деталей;

- гидроакустические колебания технологической среды (транспортируемого газа, жидкости);

- колебания связанных с машиной элементов технологической системы (трубопроводов и др.).

Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типов исследуемых механизмов, амплитудного и частотного диапазонов измеряемых на них колебаний.

В зависимости от частоты вибрацию разделяют на низко-, средне-, высокочастотную и ультразвуковую. Основной особенностью низкочастотной вибрации (обычно с частотой не более 300...500 Гц) является то, что под действием вынужденной силы машина или ее элементы колеблются как единое целое. Низкочастотная вибрация отличается большой мощностью и содержит преимущественно гармонические составляющие на частотах, кратных частоте вынуждающей силы. Диагностическими являются среднеквадратические значения параметров вибрации этих составляющих.

Параметры вибрации на средних частотах (в диапазоне от 300...500 Гц до 3...5 кГц) редко используются в качестве диагностических. Это связано с тем, что данной области соответствует большое число собственных форм колебаний как агрегата в целом, так и его отдельных узлов и элементов, что весьма усложняет выделение полезной диагностической информации.

Сложность машин и оборудования как колебательных систем еще более затрудняет использование параметров вибрации в области высоких частот. Вместе с тем высокочастотная область позволяет контролировать состояние конкретного узла при установке датчиков, регистрирующих сигнал непосредственно на узле. Это обусловлено быстрым затуханием колебаний при увеличении их частоты. Поэтому высокочастотные колебания распространяются на небольшие расстояния и могут быть зарегистрированы только при расположении датчиков в непосредственной близости от источника колебаний.

Основные методы, применяемые при обработке вибрационных сигналов, можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся так называемые метрические методы, основанные на измерении тех или иных параметров вибрации и сравнении их с эталонными или предельными значениями, характерными для исправного или предельно допустимого состояния. В зависимости от спектрального состава, распределения уровней вибрации во всем диапазоне частот и во времени, а также от нормирования допустимого уровня измеряют амплитудные, средние или среднеквадратические значения. Основным преимуществом измерения среднеквадратических значений является независимость этих значений от сдвигов фаз между отдельными составляющими спектров измеряемой вибрации.

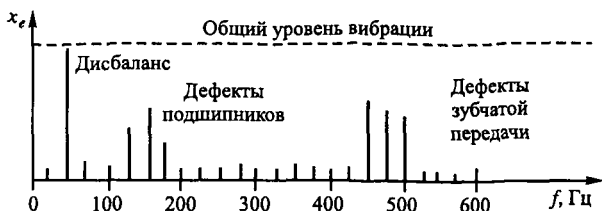


Рис. 2.7. Схема спектрального разложения вибросигнала

Регистрируемый суммарный вибросигнал обычно представляют в виде отдельных гармонических составляющих, амплитуда и частота каждой из которых рассчитывается методом быстрого преобразования Фурье. Каждая составляющая изображается на двумерном графике вертикальной линией, высота которой равна амплитуде составляющей, а положение на горизонтальной оси — ее частоте. Схематический пример спектрального разложения суммарного вибросигнала (автоспектра AS) приведен на рис. 2.7. Подробность разложения измеряется числом линий спектра на измеряемом диапазоне частот. Мониторинг и диагностика оборудования по вибросигналу основаны на факте, что каждый дефект создает вибрацию на характерной для него частоте.

Ко второй группе относятся методы, основанные на тонком вибращионном анализе: метод анализа параметров модуляции высокочастотной вибрации (ES), метод ударных импульсов (SPM), метод Кепстра и др. Выбор конкретного метода определяется необходимой глубиной диагностики.

Непрерывное отслеживание и контроль параметров вибрации оборудования называется *вибращионным мониторингом*. Практически все системы вибромониторинга позволяют контролировать общий уровень вибрации (OL), который оценивается максимальным значением измеряемого параметра вибрации. Как правило, при контроле широкополосной вибрации машин роторного типа (по ГОСТ ИСО 10816-4-99) уровень вибрации оценивается среднеквадратическим значением виброскорости, поскольку оно связано с энергией колебаний. В ряде случаев, однако, предпочтительно использование других параметров: виброперемещения или виброускорения, а также пиковых значений вместо среднеквадратических. Такие системы вибромониторинга используются обычно в качестве аварийной защиты при достижении предельного уровня вибрации. Как правило, для машин, предназначенных для длительной эксплуатации, устанавливают в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-4-99 предельные уровни вибрации, превышение которых в установившемся режиме работы машины приводит к подаче сигналов «Предупреждение» или «Останов». Сигнал «Предупреждение» подается для привлечения внимания к тому, что вибрация или изменение вибрации достигли определенного уровня, когда может потребоваться проведение вос-

становительных мероприятий. Обычно при появлении такого сигнала машину можно эксплуатировать в течение некоторого времени, пока исследуют причину изменения вибрации и определяют комплекс необходимых мероприятий. При достижении уровня «Останов» следует принять немедленные меры к снижению вибрации или остановить машину.

Системы аварийной защиты ответственных машин включают в себя, как правило, несколько каналов. При этом наряду с параметрическими каналами, контролирующими температуру, давление и др., параллельно в качестве составной части системы используются и вибрационные каналы. При использовании системы вибромониторинга в качестве аварийной защиты отключение машины при достижении уровня «Останов» осуществляется автоматически.

Практикой установлено, что общий уровень установившейся низкочастотной вибрации изменяется в период нормальной эксплуатации оборудования незначительно. Наличие разных дефектов приводит к росту составляющих вибрации на частотах, характерных для бездефектной машины, либо к появлению и росту новых составляющих на частотах, характерных для данного вида дефекта. Изменение отдельных частотных составляющих, которые могут быть значительными, не всегда в той же степени отражается на общем уровне вибрации, поэтому для раннего выявления дефектов и, соответственно, получения возможности прогнозирования ресурса машины необходимо проводить спектральный анализ низкочастотной вибрации. Такой анализ позволяет решить основные диагностические задачи и является обязательной составной частью современных систем вибрационного мониторинга.

Прогноз остаточного ресурса осуществляют на основе так называемых «водопадных» графиков и графиков тренда. «Водопадный» график представляет собой трехмерное изображение нескольких спектров, измеренных с определенным периодом и представленных на одном графике. Пример такого графика представлен на рис. 2.8. «Водопадный» график используется для построения трендов. *Тренд* — тенденция изменения соответствующего параметра;

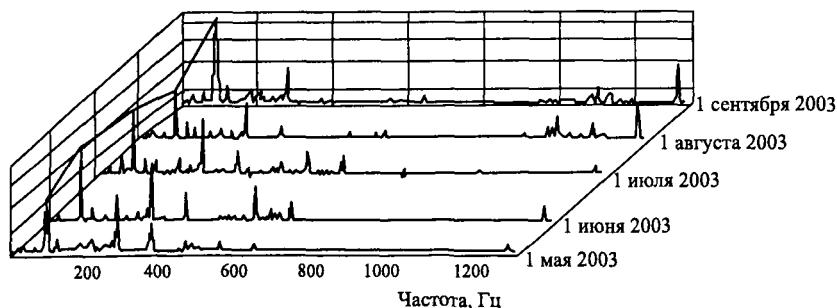


Рис. 2.8. «Водопадный» график

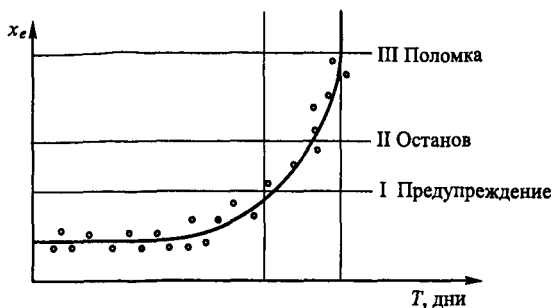


Рис. 2.9. Тренд вибросигнала

обычно представляется в виде графика изменения амплитуды вибросигнала определенной частоты с течением времени. Общий вид тренда аналогичен закономерности, приведенной на рис. 1.2, и включает в себя три стадии: приработки, нормальной эксплуатации и ускоренного накопления дефектов. Наибольший интерес для целей технической диагностики представляет вторая и начало третьей стадии тренда, приведенные на рис. 2.9 (без обозначения зоны рассеивания). Анализ трендов позволяет определить тенденцию развития дефекта и запланировать своевременный ремонт.

Разработка и внедрение систем мониторинга целесообразны прежде всего для сложного и дорогостоящего оборудования, состоящего из большого числа узлов и агрегатов, а также для оборудования, имеющего важное значение в технологическом цикле конкретного производства. Такие системы позволяют повысить эксплуатационную надежность оборудования и получить значительный экономический эффект за счет перехода на ремонт по фактическому техническому состоянию. Особое значение проблема определения технического состояния приобретает для агрегатов большой мощности, например газотурбинных газоперекачивающих агрегатов, где единичная мощность достигает 25 тыс. кВт, а их безотказная работа определяет надежность снабжения сырьем и топливом целые регионы страны.

Системы вибрационной диагностики отличаются от систем вибромониторинга более широким охватом частотного диапазона, включая высокочастотный, применением специальных методов и программных средств для обработки и анализа вибрационных сигналов. Такой углубленный анализ позволяет не только определить местонахождение и вид дефекта, но и, при наличии предельного уровня соответствующего вибрационного параметра, осуществлять прогноз остаточного ресурса оборудования. Учитывая большое число основных и дополнительных признаков идентификации дефектов и, соответственно, необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для анализа вибрационных сигналов, основным режимом работы современных систем диагностики является автоматическая постановка диагноза на основе использования соответствующих программных продуктов.

3. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

3.1. Классификация оптических методов контроля

Оптический неразрушающий контроль основан на взаимодействии электромагнитного излучения с контролируемым объектом и регистрации результатов этого взаимодействия. Методы, относящиеся к оптическому НК по ГОСТ 24521–80, различаются длиной волны излучения или их комбинацией, способами регистрации и обработки результатов взаимодействия излучения с объектом. Общим для всех методов является диапазон длин волн электромагнитного излучения, который составляет $10^{-9} \dots 10^{-3}$ м ($3 \cdot 10^{18} \dots 3 \cdot 10^{10}$ Гц) и охватывает диапазоны ультрафиолетового (УФ), видимого (ВИ) ($(3,8 \dots 7,8) \cdot 10^{-7}$ м) и инфракрасного (ИК) излучения, а также информационные параметры оптического излучения, которыми являются пространственно-временное распределение его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности. Изменение этих параметров при взаимодействии с объектом контроля в соответствии с основными физическими явлениями (интерференции, поляризации, дифракции, преломления, отражения, рассеяния, поглощения и дисперсии излучения), а также изменения характеристик самого объекта в результате эффектов люминесценции, фотоупругости, фотохромизма и др. используют для получения дефектоскопической информации. Оптическое излучение — это электромагнитное излучение, возникновение которого связано с движением электрически заряженных частиц, переходом их с более высокого уровня энергии на более низкий. При этом происходит испускание световых фотонов.

Основными количественными показателями, характеризующими оптическое излучение, являются следующие параметры:

- скорость распространения оптического излучения в вакууме $v_0 = 299792,5$ км/с. В оптически прозрачных средах излучение распространяется со скоростью

$$v = \frac{v_0}{n} = \frac{\lambda_0 f}{n} = \lambda f,$$

где n — показатель преломления среды, зависящий от ее проницаемости; λ_0 и λ — длина волны оптического излучения соответственно в вакууме и оптической среде; f — частота излучения, Гц;

- мощность потока излучения, Вт,

$$\Phi = \frac{Q}{t},$$

где Q — излучаемая энергия, Дж; t — время, с;

- сила излучения, Вт/ср,

$$I = \frac{\Phi}{\omega},$$

где ω — телесный угол, в котором распространяется поток Φ , ср;

- плотность потока излучения (освещенность), Вт/м²,

$$E = \frac{\Phi}{S},$$

где S — площадь излучения, м².

Оптические методы НК разделяют на три группы. В первую группу входят визуальный и визуально-измерительный методы, которые являются наиболее простыми и доступными, имеют наибольшее распространение и обязательны для применения при диагностировании технических устройств и объектов всех типов. Ко второй группе относятся фотометрический, денсиметрический, спектральный и телевизионный методы, которые основаны на результатах измерений с использованием электронных приборов. К третьей группе относятся интерферометрический, дифракционный, фазово-контрастный, рефрактометрический, нефелометрический, поляризационный, стробоскопический и голографический методы, использующие волновые свойства света и отличающиеся наивысшей точностью измерения — с точностью до десятых долей длины волны излучения, — но сложностью в реализации.

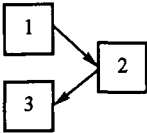
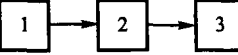
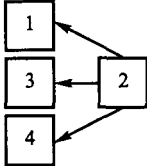
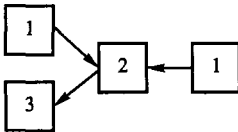
Выбор условий контроля должен сводиться к обеспечению нормальных условий освещенности контролируемого объекта, установлению требуемого режима работы и взаимного расположения объекта контроля и аппаратуры.

Схемы испытаний методами оптического вида контроля по ГОСТ 23479—79 приведены в табл. 3.1.

3.2. Особенности визуального контроля

Визуальный контроль изделий при техническом диагностировании производят с целью выявления изменений их формы, а также поверхностных дефектов (трещин, коррозионных повреждений, деформаций и др.) и выполняют, как правило, невооруженным глазом или с помощью лупы. Увеличение лупы должно быть 4...7-кратным при контроле основного материала и сварных соединений при изготовлении, монтаже и ремонте и до 20-кратного при техническом диагностировании. Приемником светового излучения при этом являются глаза человека, поэтому при организации визуального контроля необходимо учитывать особенности человеческого зрения.

Таблица 3.1

Способ освещения	Схема испытаний	Области применения
В отраженном свете		Контроль поверхностных дефектов непрозрачных материалов, измерение линейных размеров
В проходящем свете		Контроль внутренних напряжений, наличия включений в прозрачных материалах, измерение линейных размеров
В рассеянном свете		Контроль диффузно-отражающих изделий, обнаружение включений по методу темного поля, измерение блеска, цвета и яркости поверхности
Комбинированное освещение		Контроль кристаллов, полупрозрачных материалов, анализ структуры и микрорельефа поверхности изделий

Примечания: 1. Обозначения: 1 — источник излучения; 2 — объект контроля; 3 — приемное устройство; 4 — зеркальная составляющая отраженного потока.

2. Схема испытаний зависит от размера и формы объекта и выбирается с учетом оптимальных условий выявляемости конкретного типа дефектов.

3. Параметры источника излучения (интенсивность, спектр, поляризация, пространственно-временное распределение интенсивности, степень когерентности) следует выбирать так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения.

Зрение является сложным явлением, включающим процессы фокусировки изображения на сетчатке, изменения диаметра зрачка, движения глаз при сканировании изделия, восприятия и обработки зрительной информации.

Оптическая система человеческого глаза состоит из роговицы, хрусталика, радужной оболочки и сетчатки. Основные преломляющие элементы глаза — роговица и хрусталик. Оптическая (преломляющая) сила роговицы почти постоянна. Хрусталик глаза представляет собой двояковыпуклую линзу переменной кривизны, которая проецирует изображение предмета на сетчатку глаза. За счет изменения кривизны хрусталика осуществляется наводка глаза на резкость.

Между роговицей и хрусталиком находится радужная оболочка с отверстием переменного диаметра — зрачком, который выполняет роль диафрагмы. При больших (дневных) освещенностях диаметр зрачка глаза равен 2...3 мм, а при низкой освещенности увеличивается до 6...8 мм.

В сетчатке, на которую фокусируется изображение, расположены светочувствительные клетки — палочки и колбочки. Палочки не различают цветов, но более светочувствительны, чем колбочки. При адаптации глаз с течением некоторого времени к низкой освещенности палочки позволяют отличить белую поверхность от черной при освещенности 10^{-6} лк. Колбочки чувствительны к цветам, но перестают их различать при освещенности менее 10^{-2} лк. Поэтому при низкой освещенности люди цветнослепы. При большой освещенности выше $10^2 \dots 10^3$ лк зрение является почти чисто колбочковым.

Палочки и колбочки распределены в сетчатке неравномерно. В соответствии с этим поле зрения глаза можно разделить на три зоны:

- зона четкого видения — центральная зона с телесным углом около 2° ;
- зона ясного видения с полным углом зрения около 30° по вертикали и 22° по горизонтали, в пределах которой при неподвижном глазе возможно опознание предметов без различия мелких деталей;
- зона периферического зрения с полем около 150° по горизонтали и 125° по вертикали. В пределах этой зоны предметы не опознаются, но она имеет важное значение для ориентации человека в пространстве.

Каждый глаз при перекрытии зрительного поля воспринимает и передает в мозг наблюдателя картину независимо друг от друга. Изображения на двух сетчатках при этом немного отличаются. За счет этого предмет виден в трех измерениях, объемно. Способность объемного восприятия рассматриваемого предмета обоими глазами называется бинокулярным (стереоскопическим) зрением. Такое зрение по сравнению с монокулярным (одним глазом) обеспечивает более точную оценку расстояния, объема и формы предметов и более высокую чувствительность к различию яркости объектов. Способность раздельно различать по глубине детали объекта для невооруженного глаза составляет $5 \dots 10''$ для оптимальных условий наблюдения. При использовании специальных приборов (бинокулярных луп, стереомикроскопов и др.) разрешение по глубине повышается пропорционально их увеличению.

Работа мозга при визуальном контроле на самом деле очень велика и не ограничивается только способностью к бинокулярному зрению. Помимо получения на сетчатке глаза визуального изображения, необходимо еще провести обработку этого изображения в мозге. Исследования процессов опознания разных свойств зрительного изображения у человека показали, что его зрительная система (глаза — мозг) при опознании работает быстро и удачно только тогда, когда он тренировался в поиске и расшифровке интересующих его изображений и хорошо представляет себе те зрительные образы, которые он может обнаружить. Если же задача поиска и опознания непривычна, то он почти всегда решает их неудачно [17, т. 1, кн. 2].

Важнейшими факторами при визуальном контроле являются степень различимости дефектов и разрешающая способность зрения.

Степень различимости дефектов при их наблюдении зависит от контрастности, цвета, угловых размеров объектов, резкости их контуров и условий освещения, а также продолжительности рассматривания. Каждому из указанных свойств соответствует свой абсолютный порог различимости, ниже которого дефект не может быть виден, сколь бы благоприятны ни были условия наблюдения с точки зрения других свойств.

В видимой части спектра оптического излучения применяют систему единиц, соответствующую зрительному ощущению и спектральной чувствительности глаз человека. Световой поток Φ измеряется при этом в люменах ($1 \text{ лм} = 1,683 \text{ Вт}$ для $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$), сила света $I = \Phi/\omega$ — в канделах ($1 \text{ кд} = 1 \text{ лм/ср}$), освещенность $F = \Phi/S$ — в люксах ($1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$). Мерой излучения поверхности (самосветящей или светящей отраженным лучом) объекта контроля является яркость B , кд/м²:

$$B = \frac{I}{S}.$$

Наиболее важными условиями различимости считают яркостный контраст и угловые размеры дефекта. Под контрастом понимают свойство дефекта выделяться на окружающем фоне за счет разности энергетической яркости дефекта и окружающего его фона. Степень яркостного контраста оценивают величиной отношения

$$K = \frac{B_{\Phi} - B_0}{B_{\Phi} + B_0},$$

где B_0 — яркость рассматриваемого объекта; B_{Φ} — яркость окружающего фона.

При $K > 0,5$ контраст считается большим; при $0,2 < K \leq 0,5$ — средним; при $K \leq 0,2$ — малым. Минимальная величина яркостного контраста при оптимальных условиях наблюдения называется порогом контрастной видимости $K_{\text{пор}}$, которую человек еще способен различать. Для большинства людей $K_{\text{пор}}$ составляет 0,01...0,02. Отношение величины фактического контраста K дефекта к его пороговому значению $K_{\text{пор}}$ в заданных условиях определяет видимость дефекта V :

$$V = \frac{K}{K_{\text{пор}}}.$$

При видимости $V \leq 1$ на окружающем фоне даже крупные дефекты не могут быть обнаружены глазом из-за малого контраста на поверхности контролируемого объекта.

Под цветовым контрастом понимают меру различия цветов по их цветовому тону, насыщенности и яркости. Глаз способен различать большое число цветовых оттенков. Вместе с тем эта способность у

разных людей различна и проверяется с помощью специальных атласов цветов.

Максимальный контраст дефекта достигается путем подбора угла освещения и наблюдения, спектра и интенсивности источника излучения, состояния его поляризации и степени когерентности. Например, различие в отражении поляризованного света от металлов и диэлектриков используется для получения контрастного изображения дефектов (пятен масла на металле и т.п.).

Человеческий глаз неодинаково реагирует на различные длины волн электромагнитного излучения в пределах видимого диапазона (цвета). Разрешающая способность зрения e , т.е. способность различать мелкие детали изображения, зависит от цветности, яркости, контраста и времени наблюдения объекта контроля. Она максимальна в белом или желтом свете при яркости $10 \dots 100$ кд/м², высоком контрасте объекта ($[K] \geq 0,5$) и времени наблюдения $5 \dots 20$ с. При данных условиях и расстоянии наилучшего зрения до объекта $L = 250$ мм угловая разрешающая способность глаза $\alpha = 1''$. Линейное разрешение в плоскости объекта контроля $e = L \sin \alpha = 250 \cdot 0,0003 = 0,08$ мм. Реальный минимальный размер дефекта, который надежно выявляется при визуальном контроле, зависит также от личных качеств наблюдателя (зрения, опыта и т.д.). Ориентировочно полагают, что наблюдатель с нормальным зрением при визуальном контроле на расстоянии наилучшего зрения уверенно обнаруживает дефекты с минимальным размером $0,1$ мм в плоскости, перпендикулярной линии наблюдения.

Перечисленные выше основные психофизиологические особенности зрения учитываются при разработке технологических карт контроля. В них приводятся требования к уровню и типу освещенности, углам освещения и наблюдения, медицинские требования к зрению операторов, колориметрическим и фотометрическим характеристикам материалов и др., обеспечивающие наиболее благоприятные условия проведения контроля.

Визуальный контроль включает в себя наружный и внутренний осмотры объекта, при этом производится качественная оценка отклонения от заданной геометрической формы, коррозионного состояния, фиксируется наличие поверхностных дефектов сварных соединений и основного металла. Визуально оценивают состояние защитных покрытий, контролируют качество изделий по их цвету и т.п.

3.3. Визуально-оптический и измерительный контроль

Дефекты диагностируемого объекта и отклонения от заданной геометрической формы, обнаруженные при визуальном контроле, подлежат измерению с помощью различных измерительных инструментов и визуально-оптических приборов. Для измерения малых дефектов используются стандартные измерительные инструменты,

применяемые в машиностроении: линейки, рулетки, штангенциркули, глубиномеры, струны, отвесы, шаблоны и др. Измерение малых дефектов должно производиться в соответствии с РД 03-606—03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю». Учитывая, что более 95 % всех дефектов металлоконструкций возникает в сварных соединениях, в РД подробно рассмотрены виды дефектов швов и методика их измерения. При этом наряду со стандартными предусматривается использование специальных инструментов, например универсального шаблона сварщика УШС-3, штангенциркуля ШЦ-1 с опорой и др. Точность измерения с помощью перечисленных инструментов в среднем составляет половину цены деления измерительной шкалы. Примеры измерения различных параметров с помощью УШС-3 приведены на рис. 3.1.

Визуальный контроль с применением оптических средств называют визуально-оптическим. Применение оптических средств позволяет существенно расширить пределы естественных возможностей человеческого зрения: производить измерения с более высокой точностью, обнаруживать более мелкие дефекты, осуществлять контроль в недоступных для человека местах закрытых конструкций. В зависимости от увеличения разрешающая способность при этом может достигать 1...5 мкм.

Приборы для визуально-оптического контроля подразделяются на три группы:

- для контроля близко расположенных объектов (лупы, микроскопы);
- для контроля удаленных объектов (зрительные трубы, бинокли, телескопы);
- для контроля закрытых объектов (эндоскопы).

Лупы используются для контроля близко расположенных объектов при небольшом увеличении ($2\times$... $20\times$). Чем больше увеличение, тем меньше фокусное расстояние и поле обзора. Поэтому обзорными называют лупы с малым увеличением — до $2\times$... $4\times$.

Лупы с малым увеличением, такие, как очки для чтения, имеют большое фокусное расстояние, большое поле зрения и могут быть использованы для бинокулярного наблюдения. Осмотр при этом производится двумя глазами, что повышает достоверность контроля. Например, в качестве обзорных используют бинокулярные налобные лупы БЛ-1 и БЛ-2 с увеличением $1,25\times$... $2\times$. Благодаря стереоскопичности эти лупы позволяют рассматривать объекты объемно, что невозможно при наблюдении в монокулярную лупу.

Для контроля малых зон и оценки характера и размеров обнаруженных дефектов применяют измерительные лупы с увеличением до $8\times$... $20\times$. Чтобы добиться хроматической коррекции (исключения цветного окаймления), лупы с таким увеличением изготавливают составными. Их обычно склеивают из двух или трех линз, изготовленных из разных сортов оптического стекла. Многие модели современ-

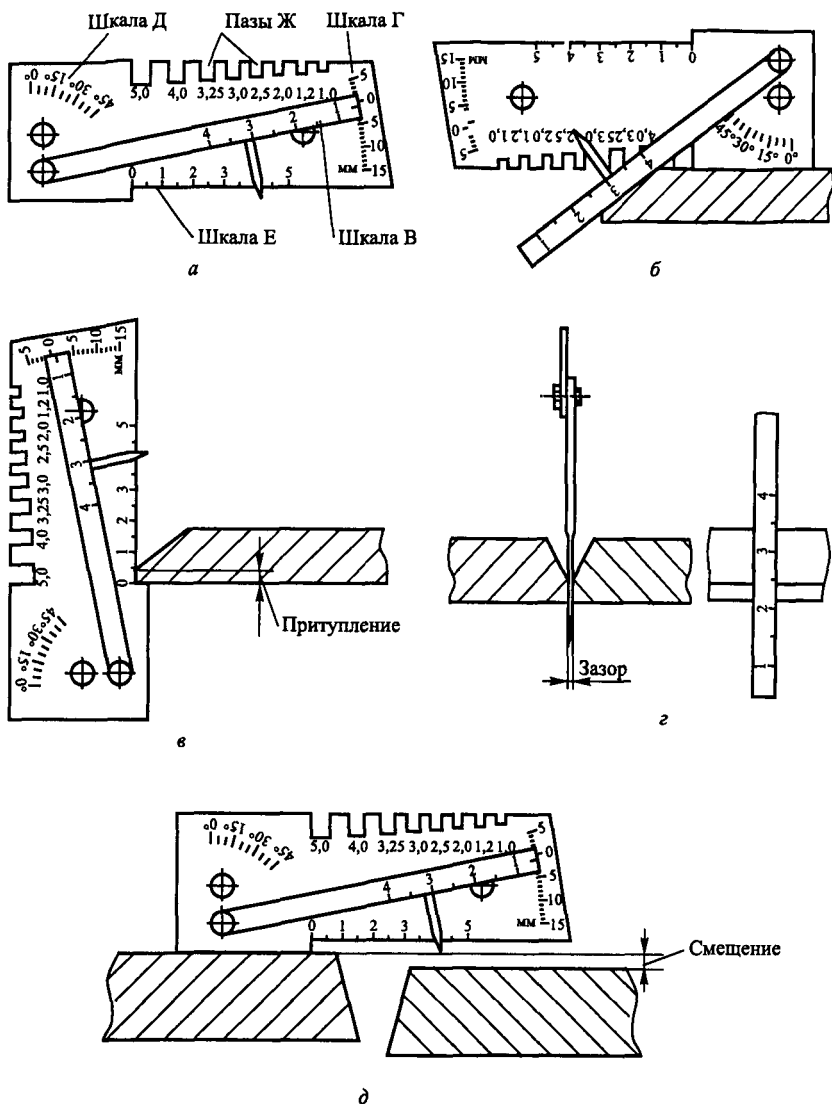


Рис. 3.1. Контроль универсальным шаблоном сварщика УШС-3:

а — общий вид шаблона УШС-3; б — измерение угла скоса разделки; в — измерение размера кромки; г — измерение зазора в соединении; д — измерение смещения наружных кромок деталей

ных луп дополнительно снабжаются осветителями от пальчиковых батареек.

Микроскоп является сложным оптическим многолинзовым устройством для наблюдения элементов, не видимых невооруженным глазом. Микроскоп имеет регулировку оптических свойств и дает возможность получить качественное изображение с увеличением до 2000х. Микроскопы с большим увеличением являются, как правило, стационарными. Для целей диагностики при визуально-оптическом контроле применяют переносные микроскопы, имеющие упрощенную конструкцию и устанавливаемые непосредственно на контролируемый объект. Их увеличение обычно не более 100х, а габаритные размеры и масса много меньше стационарных микроскопов.

Как для луп с большим увеличением, так и для микроскопов глубина резкости уменьшается, проведение контроля с их помощью усложняется и требует больше времени для фокусировки изображения (поиска расстояния наилучшего видения). Поэтому микроскопы используют в основном для определения характера и измерения дефектов, обнаруженных ранее каким-либо другим методом контроля.

Основными параметрами микроскопов, определяющими область их применения наряду с увеличением являются: величина поля зрения; рабочее расстояние микроскопа (от объектива до предмета); цена деления шкалы окулярного микроскопа ($\sim 0,01 \dots 0,005$ мм); наличие, марка и мощность осветителя; габариты и масса прибора.

Если доступ к контролируемой части изделия затруднен или изделие находится дальше расстояния наилучшего зрения, для проведения визуально-оптического контроля применяют телескопы, зрительные трубы, бинокли, перископы и другие оптические приборы. Для контроля внутренних поверхностей и обнаружения дефектов в труднодоступных местах используют промышленные эндоскопы. В нефтегазовой промышленности применяют следующие типы промышленных эндоскопических систем: жесткие эндоскопы (бороскопы), гибкие оптоволоконные эндоскопы, видеоэндоскопы. Они состоят из источника света для освещения объекта (блока подсветки), передающей оптической системы, насадки или дистального конца, изменяющих направление и размеры поля зрения прибора, объектива с окулярами для визуального наблюдения и подключения фото- или видеокамеры, механизма фокусировки объектива и управления насадкой или артикуляции дистального конца.

Конструктивно жесткие эндоскопы представляют собой линзовую конструкцию, при этом оптическая передающая система смонтирована внутри прямой трубки соответствующей длины. Жесткие эндоскопы имеют рабочую длину до 1500 мм и диаметры рабочей части 1,7; 2; 2,7; 4; 6; 8 и 10 мм. Оптическая трубка эндоскопов может вращаться на 360°. Направление обзора может быть прямым, а также составлять с осью эндоскопа угол 0, 30, 45, 70, 90 и 110°. Такие эндоскопы пригодны для работы как в воздушной среде, так и в среде нефтепродуктов, гидравлических жидкостей, большинства про-

мышленных растворителей, а также в воде. Основными недостатками жестких эндоскопов являются их большие габаритные размеры и невозможность контроля криволинейных внутренних поверхностей.

Эти недостатки устранены в гибких эндоскопах, где для передачи света и изображения используются волоконно-оптические световоды и жгуты из них. Элементарным волоконным световодом является тонкая нить диаметром 10...20 мкм, выполненная из двух оптически прозрачных слоев круглого поперечного сечения: сердечника и оболочки толщиной 1...3 мкм. Оболочка изготовлена из стекла с меньшим показателем преломления, чем сердечник. За счет этого лучи света, попадая в сердечник и испытывая полное отражение от его границы с оболочкой, передаются вдоль световода.

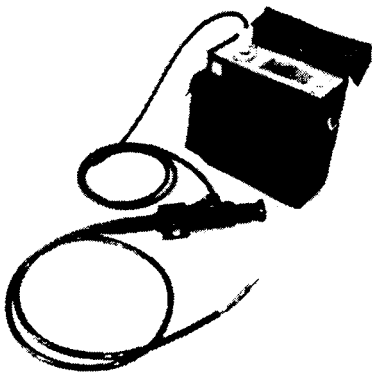
Для передачи световых потоков или изображений элементарные световоды объединяют в жгуты, помещенные в специальные чехлы-оболочки. Жгуты бывают двух видов: регулярные и осветительные. В регулярных жгутах волокна световодов в поперечном сечении укладываются упорядоченно так, что на входном и выходном торцах жгута их расположение одинаково, что позволяет переносить изображение без искажений. Осветительные жгуты могут иметь произвольное расположение волокон и предназначены для передачи света, структура которого по поперечному сечению однородна или не имеет значения.

Для расширения поля обзора оптоволоконных эндоскопов они обычно снабжаются дистальными концами с возможностью их артикуляции (изгиба дистального конца) в двух или четырех плоскостях, что позволяет наряду с переменным увеличением работать с разными углами и направлениями обзора. В качестве примера на рис. 3.2 приведен общий вид оптоволоконного эндоскопа и четырехсторонняя схема артикуляции дистального конца.

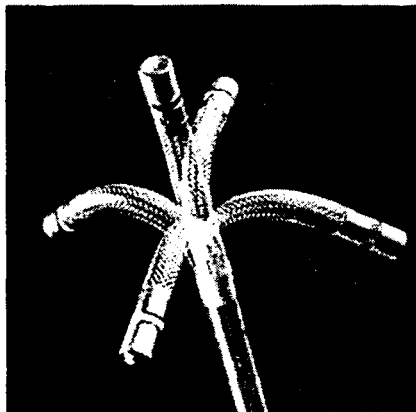
Гибкие оптоволоконные эндоскопы имеют диаметр зонда 2,4...12,4 мм и длину рабочей части 0,5...3 м. При большей длине рабочей части из-за многократного переотражения от границ сердечника с оболочкой происходит интенсивное затухание света при передаче его по световоду.

В отличие от гибких оптоволоконных эндоскопов дистальный конец видеоэндоскопов (гибких телевизионных эндоскопов) оснащается объективом и ПЗС-матрицей с высокой разрешающей способностью. Система передачи изображения эндоскопов помимо объектива и ПЗС-матрицы включает также кабель передачи сигнала, блок преобразования сигнала и видеомонитор с функцией измерения. Подсветка зоны осмотра осуществляется с помощью сверхъярких светодиодов, за счет чего видеоэндоскопы изготавливаются с длиной рабочей части до 30 м. Дополнительно к видеоэндоскопам посредством оптико-механического адаптера могут подключаться видеокамеры или цифровые фотоаппараты, позволяющие документировать результаты контроля.

Для измерения больших дефектов, линейных размеров объекта и отклонения его от заданной геометрической формы используют геодезические оптико-электронные и лазерные приборы. В процессе



a



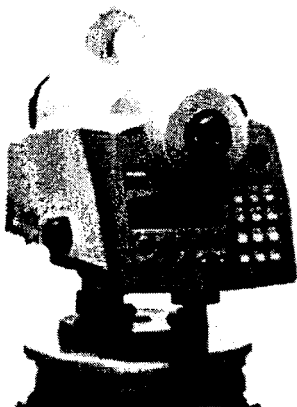
б

Рис. 3.2. Волоконно-оптический эндоскоп:

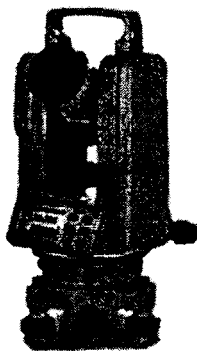
a — общий вид эндоскопа с блоком подсветки; *б* — четырехсторонняя схема артикуляции дистального конца

технической диагностики чаще всего применяют дальномеры, нивелиры, теодолиты и тахеометры (рис. 3.3).

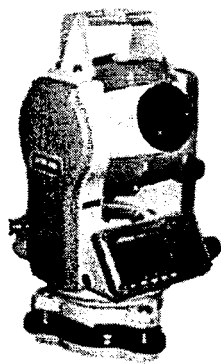
Дальномер служит для определения расстояния до заданной цели. Первые оптические дальномеры имели два объектива, разнесенные на некоторое расстояние между собой. С помощью системы



a



б



в

Рис. 3.3. Геодезические оптико-электронные приборы:

a — цифровой нивелир DiNi 22; *б* — электронный теодолит DJD5-1;
в — электронный тахеометр DTM-352W

линз и зеркал изображения объекта контроля от разных объективов передавались в один окуляр и накладывались друг на друга. Изменяя фокусировку, раздвоенное изображение совмещалось в единое и по шкале отсчета определялось расстояние до объекта. Для повышения точности расстояние между объективами (база) принималось максимально большим, что увеличивало габариты и массу дальномеров и делало их громоздкими. Однако даже увеличение базы между объективами не обеспечивало требуемой точности измерения.

В настоящее время вместо оптических дальномеров повсеместно используют компактные лазерные дальномеры. Это стало возможным с созданием малогабаритных лазеров, при этом точность измерения дальномеров повысилась на несколько порядков. Принцип действия лазерного дальномера достаточно прост. Оператор, направив дальномер на цель, нажатием кнопки активирует лазер, который посылает луч в сторону цели. Специальное приемное устройство дальномера улавливает отраженный от цели луч. Дальномер имеет счетчик интервалов времени (электронные часы), который включается в момент выхода луча из дальномера и выключается в момент его возвращения. По известной скорости света и времени прохождения луча вперед и обратно определяется расстояние до цели. Наиболее совершенные лазерные дальномеры, применяемые в спутниковых системах навигации, оснащаются счетчиками интервалов времени с точностью $1 \cdot 10^{-9}$ с (такая единица времени называется наносекундой) и даже точнее. Это позволяет определять расстояние с точностью до $0,2 \cdot 10^{-5} \%$. Стандартные лазерные «рулетки» и дальномеры, используемые в комплекте с вехами или штативами с угловыми отражателями, имеют точность, достигающую 1,5 мм на 100 м. Широкое распространение в последние годы получили дальномеры, позволяющие измерять расстояние непосредственно до объекта без отражателя. В связи с зависимостью точности измерений от свойств отражающей поверхности и надежности фиксации точки измерения дальность таких приборов не превышает 100...150 м, а точность лежит в пределах 10...20 мм.

Нивелиром называют оптический прибор для определения высотных отметок всего объекта или его части. Теодолит — более универсальный прибор, он позволяет, наряду с высотными, определять также угловые отметки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Такие приборы в процессе диагностики применяют как для установления отклонений от заданной геометрической формы локального участка диагностируемой конструкции, так и отклонения всего объекта от проектного положения. В последнем случае производят геодезическую съемку объекта (нефтепровода, нефтехранилища и др.) с определением высотных, угловых и координатных отметок.

Основными недостатками оптических нивелиров и теодолитов являются высокая трудоемкость выполнения работ и низкая точность измерений. Эти проблемы устраняются с появлением нового поколения геодезических приборов — цифровых. Принцип их действия и возможности рассмотрим на примере цифрового нивелира DiNi 22 (рис. 3.3, а), производимого фирмой «Carl Zeiss». Такой ни-

велир автоматически считывает величину высотных отметок со специальной кодовой рейки и сохраняет их в память. В отличие от обычных шашечных геодезических реек, на поверхности специальных реек нанесен штрих-код, представляющий собой чередующиеся светлые и черные горизонтальные полосы различной толщины (аналогично штрих-коду на упаковках с продуктами для считывания информации о товаре кассовыми аппаратами в магазинах). Отсчеты по кодовым рейкам могут браться с точностью до 0,01 мм, при этом одновременно производится дальномерный отсчет. Данные измерений выдаются на дисплей и записываются во внутреннюю память прибора, что исключает необходимость в трудоемком заполнении полевых журналов. Паспортная точность цифрового нивелира при работе с кодовой рейкой составляет 0,7 мм на 1 км двойного хода.

Электронный тахеометр — наиболее современный геодезический оптико-электронный прибор, позволяющий одновременно совместить функции электронного теодолита, лазерного высокоточного дальномера и полевого компьютера. «Тахеометр» в переводе с греческого языка означает «быстроизмеряющий». Современный электронный тахеометр измеряет углы и расстояния до вехи или штатива с отражателем. С его помощью геодезист может один, без вспомогательного рабочего, провести геодезическую съемку без полевых журналов и, сбросив всю информацию на компьютер, провести ее обработку с помощью прикладных программ. Ряд узкоспециальных задач решаются непосредственно на месте с помощью встроенного контроллера (микропроцессора-вычислителя), управляемого клавиатурой. Вместе с тем тахеометры не способны производить высокоточное нивелирование.

Современные тахеометры значительно различаются по своим техническим характеристикам и конструктивным особенностям в зависимости от ориентации на конкретного пользователя или сферу применения. Так, ряд моделей тахеометров представляют собой совмещенную систему, объединяющую возможности тахеометра и спутникового приемника, принимающего сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС) или GPS (Global Positioning System). Использование таких приборов в режиме статики (GPS-приемник находится на закрепленной точке с известными координатами, а «мобильный» прибор перемещается по определенным точкам, производя измерения) позволяет получать координаты пунктов с точностью до 1 м. Измерения при этом можно производить приемниками, находящимися на расстоянии нескольких десятков километров друг от друга в любое время и в любую погоду. Такие пункты (точки), в свою очередь, используются как станции тахеометрической съемки. Подобные системы особенно эффективны при геодезической съемке магистральных нефте- и газопроводов в местностях со слабым геодезическим обеспечением (районы Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока).

4. КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ

Неразрушающий контроль проникающими веществами основан на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта. Контроль проникающими веществами, как вид неразрушающего контроля, в зависимости от типа выявляемых дефектов разделяют на два подвида:

- капиллярный — для выявления поверхностных дефектов;
- течеискание — для выявления сквозных дефектов. В свою очередь капиллярный контроль и течеискание разделяют на методы в зависимости от вида первичного информативного параметра (типа проникающего вещества) и способа получения первичной информации (см. табл. 1.3).

В качестве проникающего вещества могут использоваться как жидкости, так и газы. Последние применяются в различных методах течеискания, основанных на законах термодинамики, акустики и др. Методы выявления дефектов с помощью жидких проникающих веществ используются как в течеискании, так и в капиллярном контроле и основаны на таких физических явлениях при взаимодействии жидкости с твердыми телами, как смачивание, капиллярные и сорбционные явления.

4.1. Физическая сущность капиллярного контроля

Капиллярный контроль осуществляется путем нанесения жидких проникающих веществ, называемых *пенетрантами*, их проникновения в полости поверхностных и сквозных дефектов и регистрации образующихся на поверхности объекта контроля индикаторных следов. Важнейшим свойством пенетрантов является их способность к смачиванию материала объекта контроля. Явление смачивания вызывается силами взаимного притяжения атомов или молекул жидкости либо твердого тела. Молекулы, находящиеся внутри однородного вещества, испытывают одинаковое притяжение с разных сторон и находятся в состоянии равновесия. Молекулы, находящиеся на поверхности, испытывают разные притяжения с внутренней и наружной стороны, граничащей с поверхностью среды. Равновесие при этом достигается при минимуме свободной энергии молекул на поверхности. В связи с этим они стремятся приобрести форму с минимальной наружной поверхностью. В твердом теле этому препятствуют явления упругости формы, а жидкость в невесомости под влиянием этого явления приобретает форму шара. Таким образом, поверхности жидкости и твердого тела стремятся сократиться и возникают силы поверхностного натяжения [4].

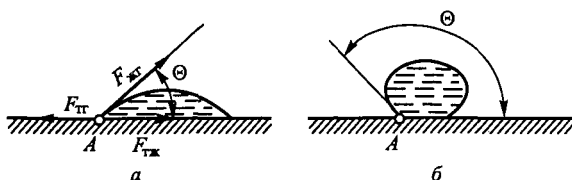


Рис. 4.1. Смачивание (а) и несмачивание (б) поверхности твердого тела жидкостью

При контакте жидкости с твердым телом возможны два случая: смачивание и несмачивание поверхности (рис. 4.1). При смачивании жидкость растекается по поверхности, а при несмачивании собирается в каплеобразную форму. При погружении капиллярной трубки в смачиваемую или несмачиваемую жидкость в трубке соответственно образуется вогнутый или выпуклый мениск (рис. 4.2).

Рассмотрим каплю жидкости, лежащую на поверхности твердого тела [3, 4]. Выделим на рис. 4.1 элементарный цилиндр в точке А, где соприкасаются твердое тело, жидкость и окружающий газ. На единицу длины этого цилиндра действуют три силы поверхностного натяжения: твердое тело—газ $F_{тг}$, твердое тело—жидкость $F_{тж}$ и жидкость—газ $F_{жг}$. Когда капля находится в состоянии покоя, равнодействующая проекций этих сил на поверхность твердого тела равна нулю:

$$F_{жг} \cos \theta + F_{тж} - F_{тг} = 0;$$

$$\cos \theta = (F_{тг} - F_{тж}) / F_{жг}.$$

Угол θ называют краевым углом смачивания.

Если $F_{тг} > F_{тж}$, то угол $\theta < 90^\circ$. Это значит, что жидкость смачивает твердое тело (см. рис. 4.2, а): чем меньше θ , тем сильнее смачивание. Предельный случай будет соответствовать полному смачиванию, т. е. растеканию жидкости по всей поверхности твердого тела.

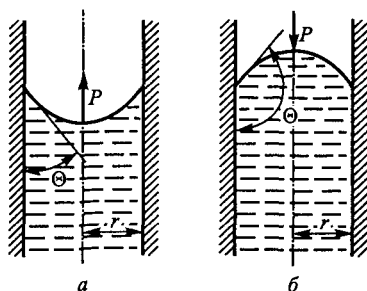


Рис. 4.2. Образование вогнутого (а) и выпуклого (б) менисков в капиллярной трубке, наполненной соответственно смачивающей и несмачивающей жидкостями

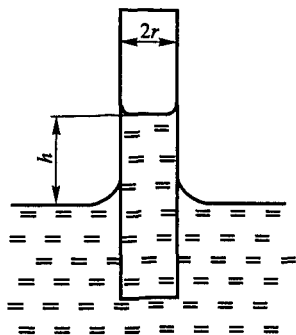


Рис. 4.3. Схема к расчету капиллярного давления

Если $F_{\text{тж}} > F_{\text{тг}}$, то $\cos\theta < 0$, следовательно, угол $\theta > 90^\circ$ (см. рис. 4.2, б). Это означает, что жидкость не смачивает твердое тело. В пределе $F_{\text{тж}} > F_{\text{тг}} + F_{\text{жг}}$, что соответствует полному несмачиванию.

Для большинства хорошо смачивающих веществ $\cos\theta$ близок к единице. Например, для границы стекла с водой $\cos\theta = 0,685$, с керосином $\cos\theta = 0,90$, с этиловым спиртом $\cos\theta = 0,955$.

Большое влияние на смачивание поверхности оказывает наличие загрязнений. Например, слой масла на поверхности стали или стекла резко ухудшает смачивание ее водой, и $\cos\theta$ при этом становится отрицательным.

Разница сил $F_{\text{тг}}$ и $F_{\text{тж}}$ называется силой смачивания, действующей на единицу длины поверхности:

$$F_{\text{тг}} - F_{\text{тж}} = F_{\text{жг}} \cos\theta.$$

При попадании смачивающей жидкости в полости дефектов малых размеров жидкость под действием силы смачивания проникает внутрь этих полостей. В качестве примера рассмотрим капиллярную трубку диаметром $2r$, погруженную в смачивающую жидкость (рис. 4.3). Под действием сил смачивания жидкость в трубке образует вогнутый мениск и поднимается на некоторую высоту h над поверхностью. Суммарная сила смачивания, действующая на длине окружности мениска, в состоянии равновесия уравнивается весом столба жидкости:

$$F_{\text{жг}} \cos\theta \, 2\pi r = \rho g \pi r^2 h,$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Оценим давление P , создаваемое силой смачивания. Для этого разделим обе части равенства на площадь трубки:

$$P = \frac{2F_{\text{жг}} \cos\theta}{r} = \rho g h,$$

отсюда

$$h = \frac{2F_{\text{жг}} \cos\theta}{r\rho g}.$$

Таким образом, чем меньше радиус капилляра, тем больше капиллярное давление P и высота подъема h .

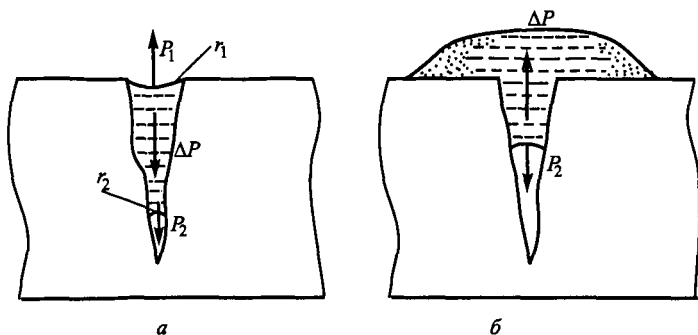


Рис.4.4. Схемы проникновения жидкости в глубь тупиковой трещины (а) и проявления индикаторных следов дефектов (б)

Рассмотрим процесс проникновения смачивающей жидкости (пенетранта) в глубь тупиковой трещины [3, 13]. После пропитки объекта контроля и удаления излишков пенетранта с его поверхности в тупиковой трещине образуются два мениска (рис. 4.4): в устье радиусом r_1 и вблизи вершины трещины — радиусом r_2 , при этом $P_2 > P_1$. Разность давлений, вызванных различием r_1 и r_2 , составляет:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 2F_{\text{жл}} \cos \theta (1/r_2 - 1/r_1).$$

Дальнейшему продвижению пенетранта в глубь трещины под действием ΔP препятствует давление сжатого воздуха в замкнутом объеме вблизи вершины трещины, уравнивающее ΔP . Величина ΔP определяет чувствительность метода и возрастает с увеличением различия радиусов менисков r_1 и r_2 . Отсюда следует, что глубокие, расширяющиеся к устью дефекты будут выявляться лучше.

Смачивающие жидкости (пенетранты) заполняют узкие полости дефектов любой формы. Необходимым условием заполнения является то, что размеры этих полостей должны быть настолько малы, чтобы жидкость могла образовать мениск сплошной кривизны без плоских участков.

Если на мениск, распложенный в устье трещины, наложить какое-нибудь пористое вещество, то он исчезнет, и вместо него образуется система малых менисков различной формы и большой кривизны с малыми r_i , каждый из которых создает свое капиллярное давление P_i . Равнодействующая $\Delta P = \sum_{i=1}^{\infty} P_i$ созданных менисками капиллярных давлений существенно превышает давление P_2 и действует в противоположном ему направлении. Под действием суммы давлений $\sum_{i=1}^{\infty} P_i$ пенетрант из полости трещины поднимается на по-

верхность контролируемого объекта, несколько расплываясь над дефектным участком и образуя так называемый индикаторный след. Угол зрения на трещину при этом увеличивается, и индикаторный след можно наблюдать невооруженным глазом или в лупу с небольшим увеличением (рис. 4.4, б). Вещества, вытягивающие пенетранты из полостей дефектов, называют *проявителями*. Здесь действуют явления *сорбции*, т. е. поглощения. Различают *адсорбцию* — поглощение вещества на границе разрыва фаз, и *абсорбцию* — поглощение вещества всем объемом поглотителя. Если сорбция происходит преимущественно в результате физического взаимодействия, то ее называют физической. Поглощение пенетранта на поверхности частиц проявителя путем их смачивания — явление физической адсорбции. Реже используется химическое взаимодействие пенетранта с веществом снаружи и внутри проявителя. Это явление химической абсорбции.

Индикаторные следы на контролируемой поверхности, образующиеся в результате взаимодействия пенетранта и проявителя, определяют положение соответствующих дефектов. Для повышения визуального восприятия в пенетрант вводят люминофоры, обладающие способностью люминесцировать при воздействии ультрафиолетового излучения, либо цветовые добавки, придающие индикаторному рисунку высокий яркостный и цветовой контраст по сравнению с фоном.

4.2. Классификация и особенности капиллярных методов

Капиллярные методы контроля предназначены для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом дефектов, выходящих на поверхность, и позволяют контролировать изделия любых форм и размеров, изготовленных как из металлических, так и неметаллических материалов. Имеют ограниченное применение для сварных швов, так как требуют предварительной механической обработки их поверхности с целью удаления чешуйчатости, брызг, окалин и обеспечения плавных переходов между основным и наплавленным металлом. Капиллярный контроль в зависимости от типа проникающего вещества разделяют на контроль с помощью жидких проникающих растворов различного состава и контроль с применением фильтрующихся суспензий (см. табл. 1.3). По способу получения первичной информации (в зависимости от состава проникающего раствора) выделяют яркостный, цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной методы.

Яркостный (ахроматический) метод основан на регистрации контраста ахроматического индикаторного следа (рисунка) на поверхности контролируемого объекта в видимом излучении. Простейшим примером применения яркостного метода является метод керо-

синовой или керосино-масляной пробы. При этом в качестве пенетранта используют керосин или его смесь с маслом, а в качестве проявителя — водный или спиртовый раствор мела (спиртовый сохнет быстрее).

Цветной (хроматический) метод в отличие от яркостного основан на регистрации цветных (как правило, ярко-красных) индикаторных следов и отличается несколько большей чувствительностью. Недостатком цветного метода являются высокие требования к остроте зрения, а также отсутствие у контролера нарушений цветового восприятия — дальтонизма (дальтонизм — привилегия мужчин, женщины этим страдают очень редко).

Люминесцентный метод предусматривает введение в пенетрант люминофоров и дополнительно требует наличия источника ультрафиолетового излучения. При облучении индикаторных следов длинноволновым ультрафиолетовым излучением происходит люминесцирование видимым излучением. Это обеспечивает резкое увеличение контраста индикаторных следов на фоне поверхности контролируемого объекта и повышает чувствительность по сравнению с яркостным методом в некоторых случаях в несколько раз.

Люминесцентно-цветной метод объединяет достоинства и недостатки рассмотренных выше методов. Индикаторный след от дефекта при этом светится при ультрафиолетовом облучении и окрашен при освещении в видимом диапазоне спектра.

С применением фильтрующих суспензий контролируют конструкции, изготовленные из пористых материалов. Суспензия в своем составе помимо проникающей жидкости содержит цветные, люминесцентные или люминесцентно-цветные вещества размером от тысячных до сотых долей миллиметра. Проникающая жидкость при нанесении ее на контролируемую поверхность поглощается пористым материалом. Поглощение происходит наиболее интенсивно в зоне дефектов, при этом взвешенные частицы, размер которых превышает размер пор, отфильтровываются и осаждаются над дефектом. Места скопления отфильтрованных частиц легко обнаруживаются за счет контраста на фоне поверхности контролируемого объекта.

В отдельный класс выделяют методы, в которых для индикации пенетранта, оставшегося в полости дефекта, применяют различные приборные средства. Эти методы называют комбинированными, поскольку в них для обнаружения дефектов помимо капиллярного эффекта используют также другие физические явления. Согласно ГОСТ 18442—80, к ним относят: капиллярно-электростатический, капиллярно-электроиндукционный, капиллярно-магнитный, капиллярно-радиационный поглощения и капиллярно-радиационный отражения.

4.3. Технология капиллярного контроля

Капиллярные методы неразрушающего контроля широко используют в процессе технической диагностики различных видов нефтегазового оборудования: например, для выявления поверхностных дефектов корпусов вертлюгов, щек талевых блоков, буровых крюков и др. Контроль проводят по следующим этапам: подготовка поверхности объекта к контролю, обработка дефектоскопическими материалами, осмотр и выявление дефектов, окончательная очистка контролируемой поверхности.

Подготовка объекта к контролю включает в себя очистку и сушку контролируемой поверхности и полостей дефектов. Цель этого этапа заключается в обеспечении доступа индикаторного пенетранта в дефекты, а также в устранении возможности образования фона и ложных индикаций. Очистка может производиться следующими способами: механическим, растворителями, химическим, электрохимическим, ультразвуковым. Механический способ используют при наличии на поверхности ржавчины, окалины, сварочного флюса, краски и т. д. Очистку осуществляют путем пескоструйной обработки, металлическими щетками, механическим шлифованием, шабрением и др. Недостатком этого способа является высокая вероятность закрытия устьев полостей дефектов.

При отсутствии механических препятствий проникновения пенетранта для очистки поверхности применяют органические растворители и водные моющие средства, наносимые вручную. Для интенсификации процесса очистки изделие может погружаться в ультразвуковую ванну с моющим раствором. В более ответственных случаях применяют химическую или электрохимическую очистку, заключающуюся в травлении поверхности слабыми растворами кислот или травлении под воздействием электрического поля.

После очистки изделия непосредственно перед нанесением пенетранта производится его сушка с целью удаления воды или растворителя с поверхности изделия и полостей дефектов, затем проверка контролируемой поверхности на степень обезжиривания. Наиболее простой метод оценки степени обезжиривания основан на способности воды или моющего раствора сохранять на обезжиренной поверхности металла в течение определенного времени сплошности, т. е. не собираться в капли. Поверхность считается обезжиренной, если в течение 60 с сплошность пленки воды не нарушилась.

Обработка дефектоскопическими материалами составляет основную часть процесса контроля и выполняется в следующем порядке: нанесение пенетранта на контролируемую поверхность, удаление избытков пенетранта, нанесение проявителя. Нанесение пенетранта производится погружением, кистью или напылением с помощью аэрозольного баллона, пульверизатора или краскораспылителя. Для лучшего проникновения в полости дефектов пенетрант в зависимости от его состава выдерживают на поверхности 10...20 мин, после

чего избыток пенетранта удаляют с помощью протирки обтирочными материалами, смоченными в очистителе, или промыванием струей воды. В некоторых случаях для интенсификации пропитки применяют воздействие ультразвуковых колебаний, повышение избыточного давления или, наоборот, вакуумирование. Неполное удаление пенетранта с поверхности приводит к образованию фона и появлению ложных индикаций. Вместе с тем при удалении избытков пенетранта важно не вымыть его из полостей дефектов. Иногда для окончательного удаления избытков пенетранта используют специальные вещества — гасители, позволяющие в результате химического воздействия на тонкий поверхностный слой пенетранта устранить фон на контролируемой поверхности (ГОСТ 18442—80).

Проявление — это процесс образования индикаторных следов в местах наличия дефектов. Проявитель в виде тонкодисперсного порошка или водной или спиртовой суспензии наносят на поверхность после ее подсушивания. Способы нанесения те же, что и для пенетранта. Важным требованием является равномерность распределения пенетранта по поверхности.

Выявление дефектов производится визуально — путем осмотра контролируемой поверхности через 10...20 мин после нанесения проявителя. Для ускорения проявления может использоваться вакуумирование, нагрев или вибрация. При яркостном и цветном методе обязательным условием является хорошее освещение поверхности объекта контроля. При использовании люминесцентного метода выявление дефектов производится в затемненном пространстве по индикаторным следам, светящимся под воздействием ультрафиолетового излучения. Требования к уровню освещенности при разных методах и допускаемые к применению источники света приведены в ГОСТ 18442—80.

В ряде случаев проявить индикаторные следы удастся без предварительной пропитки пенетрантом, используя свойства технологической среды конкретного оборудования. Так, если в трещине находится щелочь, то ее можно проявить фенолфталеином. Если оборудование работает в масляной среде, то ее удаляют (протирают) и осматривают при облучении ультрафиолетовой лампой. Индикаторные следы всех дефектов становятся отчетливо заметными, так как масло является хорошим люминофором. При наличии сомнений поверхность протирают еще раз и контроль повторяют заново.

4.4. Проверка чувствительности капиллярного контроля

Чувствительность капиллярного контроля помимо соблюдения заданной технологии в значительной мере определяется качеством, правильностью подбора и совместимостью дефектоскопических материалов: выбранный пенетрант должен хорошо смачивать поверх-

ность контролируемого объекта, смываться очистителем, проявляться соответствующим проявителем. В связи с этим дефектоскопические материалы в нормативно-технической документации на капиллярный контроль соответствующих объектов всегда рекомендуются в виде наборов или комплектов.

Чувствительность капиллярных методов определяется наименьшей шириной раскрытия выявленных дефектов при обязательном соблюдении следующих условий: использование заданных дефектоскопических материалов и соблюдение технологии контроля. Достижимый класс чувствительности (по ГОСТ 18442–80) в зависимости от ширины раскрытия дефекта приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Класс чувствительности	Минимальная ширина раскрытия дефекта, мкм
1	< 1
2	1 ... 10
3	10 ... 100
4	100 ... 500
Технологический	Не нормируют

Для комплексной проверки чувствительности различных методов применяют контрольные образцы с естественными или искусственными дефектами. Образцы с естественными дефектами представляют собой части изделия с дефектами, соответствующими 1–4 классам чувствительности.

Наибольшее применение нашли контрольные образцы с искусственными дефектами, конструкции и методика изготовления которых регламентирована ГОСТ 23349–78.

Методика изготовления образцов предусматривает создание на их поверхности трещин заданной глубины. Для этого одну из поверхностей стальных пластинчатых образцов шлифуют и азотируют, благодаря чему поверхностный слой глубиной 0,3...0,4 мм становится хрупким. Далее образцы деформируют, например путем изгиба, вдавливая индентор со стороны, противоположной азотированной. Образование трещин при этом сопровождается характерным хрустом, а их глубина равна глубине азотированного слоя.

Комплект состоит из двух образцов, один из которых является рабочим для повседневного применения, а второй — контрольным, предназначенным для арбитражных вопросов. Образцы хранятся в футляре, предохраняющем их от загрязнения, и снабжаются аттестационными паспортами, в которых приводятся ширина и протяженность трещин и фотография образца с индикациями дефектов.

5. ТЕЧЕИСКАНИЕ

5.1. Термины и определения течеискания, количественная оценка течей

Методы течеискания [2, 3, 4], как и методы капиллярного контроля, относятся к виду неразрушающего контроля проникающими веществами (см. табл. 1.3).

Течеисканием называют вид неразрушающего контроля, обеспечивающий выявление сквозных дефектов в изделиях и конструкциях, основанный на проникновении через такие дефекты проникающих веществ. *Течами* называют канал или пористый участок перегородки, нарушающий ее герметичность, т. е. течи бывают сквозные и пористые. Часто термин «течеискание» заменяют термином «контроль герметичности». Все сосуды, аппараты и трубопроводы нефтегазохимической промышленности, предназначенные для хранения, переработки и транспортировки жидких и газообразных веществ, подлежат испытанию на прочность и герметичность.

Герметичностью называют свойство конструкций препятствовать проникновению через их стенки жидкости, газа или пара. Абсолютно герметичных конструкций не бывает, так как даже при отсутствии течи проникновение пробных веществ через перегородки конструкции может быть обусловлено и чисто диффузными процессами. Поэтому конструкцию называют герметичной, если проникновение газа или жидкости через нее настолько мало, что им можно пренебречь. В условиях эксплуатации вводят понятие *нормы герметичности*, которое характеризуется суммарным расходом вещества через течи конструкции, при которой сохраняется ее работоспособное состояние.

Герметичность конструкции может быть нарушена вследствие ряда причин:

- химического взаимодействия материала с технологической средой;
- механических повреждений, износа трущихся элементов и уплотнений;
- коррозии металла и сварных соединений;
- раскрытия разъемных соединений или течей, закрытых в нормальном состоянии, из-за температурных деформаций или превышения внутреннего давления;
- деградации свойств конструкционных материалов (основного металла, уплотнений).

В процессе испытаний изделий на герметичность используют пробные, индикаторные и балластные вещества. Пробным называют вещество, проникновение которого через течь обнаруживается при течеискании. Балластные вещества используют для создания большого перепада давления и, соответственно, повышения чувствитель-

ности испытаний при малых концентрациях пробных веществ. Индикаторными называют вещества, применяемые для индикации (обнаружения) выхода пробных веществ через течь на другую сторону конструкции (проявитель, люминофоры).

В качестве пробных веществ применяют жидкости, газы, пары легколетучих жидкостей. В зависимости от пробного вещества методы разделяют на жидкостные или газовые. Шире используют газы, обеспечивающие более высокую чувствительность. В качестве пробных применяют, как правило, инертные газы (гелий, аргон), имеющие низкое содержание в атмосфере и не взаимодействующие с материалом объекта контроля или веществом внутри него. Роль пробного вещества может также выполнять газ, заполняющий контролируемый объект при эксплуатации или хранении (фреон, хлор, аммиак).

В некоторых случаях в качестве пробных веществ применяют легколетучие жидкости: спирт, ацетон, бензин, эфир. Обычно индикаторы улавливают пары этих жидкостей, тогда способы контроля такими жидкостями относят к газовым.

К жидким пробным веществам относят воду, применяемую при гидроиспытаниях (гидроопрессовке), воду с люминесцирующими добавками, облегчающими индикацию течей, а также смачивающие жидкости — пенетранты.

Для количественной оценки течи при применении жидкости в качестве пробного вещества используют объем жидкости, проникающей через течь в единицу времени. При использовании газовых пробных веществ количественную оценку производят в единицах мощности.

При контроле герметичности конструкции обычно (за исключением случаев использования пенетрантов) создают по ее сторонам разность давлений. Количество газа q , Н·м, определяют по формуле

$$q = pV,$$

где p — давление газа, Па или Н/м²; V — объем газа, м³.

Поток газа Q , Вт, через течь равен количеству газа за единицу времени t :

$$Q = \frac{q}{t} = \frac{pV}{t}.$$

Физический смысл того, что поток измеряется в единицах мощности, состоит в том, что произведение давления на объем — энергия, запасенная в газе, а изменение энергии во времени — мощность.

В смеси газов концентрацию каждого компонента γ_k определяют отношением количества этого компонента q_k к количеству q газа в целом:

$$\gamma_k = q_k/q.$$

Объем, занимаемый смесью и всеми ее компонентами, имеет постоянное значение, поэтому

$$\gamma_k = \frac{p_k V}{p V} = \frac{p_k}{p}.$$

Отсюда

$$p_k = \gamma_k p,$$

где p_k — парциальное давление компонента в смеси газов, т. е. такое давление, при котором только этот компонент смеси газов занимает весь объем.

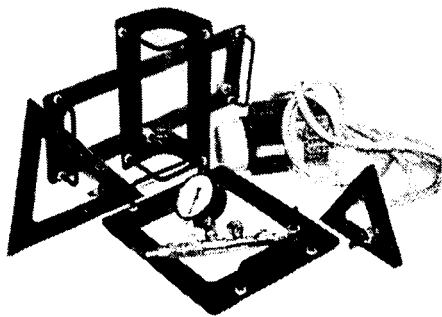
5.2. Способы контроля и средства течеискания

Для контроля герметичности различных конструкций с помощью пробных веществ (за исключением пенетрантов) необходимо создание разности давлений по разные стороны их стенок. При этом помимо пробных веществ требуются устройства для создания и измерения разности давлений (компрессоры, насосы, манометры и др.), а также средства обнаружения выхода пробного вещества через течи. Для обнаружения течей применяют как специальные приборы — течеискатели, так и неприборные средства, например используют люминесцирующие вещества или методы капиллярного контроля.

Объекты нефтегазовой промышленности, контролируемые методами течеискания, являются незамкнутыми и позволяют воздействовать как на их внешнюю, так и внутреннюю поверхности. Соответственно по способу создания разности давлений различают схему с внутренним и внешним избыточным давлением. При этом не обязательно создавать по разные стороны конструкции разности абсолютных давлений газовой смеси. Достаточно разности парциального давления пробного газа.

Способ, при котором для создания разности давлений объект контроля откачивают, называют вакуумным. Способ, предусматривающий создание внутреннего избыточного давления выше атмосферного, называют опрессовкой. При опрессовке газом внутреннее давление принимается всегда значительно ниже расчетного по условию прочности, что обусловлено возможными катастрофическими последствиями от разрыва объекта контроля. При гидроопрессовке разлет осколков не происходит и ее проводят с давлением на 25...50 % выше номинального рабочего. Обязательным условием при этом является отсутствие воздушных скоплений («подушек», «пробок»). Поэтому перед гидроопрессовкой воздух из неventedируемых полостей откачивают, а из вентилируемых выпускают через вентиль, установленный в верхней части полости (воздушник). В общем слу-

Рис. 5.1. Комплект контроля герметичности



чае перечень опасных и вредных факторов, сопровождающих процессы испытаний на герметичность, требования промышленной и экологической безопасности приведены в ГОСТ 30703—2001.

И для опрессовки, и для вакуумного способа возможны две схемы контроля: интегральная и локальная. При интегральной схеме анализируют состав и количество газа, проникающего в объект контроля извне или, наоборот, изнутри. При локальной схеме поиска каждую течь обнаруживают отдельно с помощью щупа, улавливающего появление пробного газа, вакуумной камеры-присоски или визуально.

Например, при контроле герметичности сварных швов вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов применяют локальные вакуумкамеры, в которых создается разрежение над контролируемым участком с перепадом давления не менее 250 мм вод. ст. Неплотность сварного шва обнаруживается по образованию пузырьков в нанесенном на сварные соединения мыльном или другом пенно-образующем растворе. Контроль герметичности при этом осуществляется с помощью комплекта оборудования, состоящего из набора плоских и угловых вакуумных камер-присосок, вакуумного насоса и арматурного блока с вакуумметром. Общий вид такого комплекта, выпускаемого НИКИМТ, приведен на рис. 5.1.

Локальная схема контроля путем опрессовки применяется, например, в соответствии с ПБ 03-605—03 для контроля герметичности сварных швов приварки усиливающих листовых накладок люков и патрубков на стенке резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Контроль производится путем создания избыточного воздушного давления 400...4000 мм вод. ст. в зазоре между стенкой резервуара и усиливающей накладкой с использованием для этого контрольного отверстия с резьбой М10×1,5 в усиливающей накладке (рис. 5.2). При этом на сварные швы как внутри, так и снаружи резервуара наносится мыльная пленка, пленка льняного масла или другого пенообразующего вещества, позволяющего обнаружить утечки.

Основные характеристики наиболее часто используемых методов течеискания приведены в табл. 5.1 (по данным Волгоградского НИИхимнефтеаппаратуры).

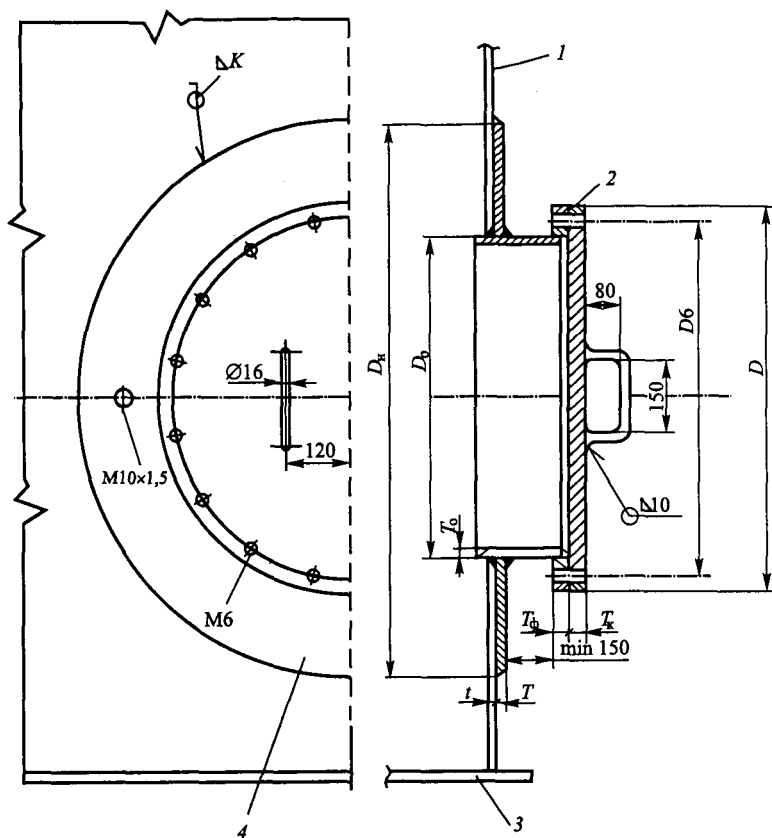


Рис. 5.2. Конструкция люка-лаза круглого в первом поясе стенки резервуара:
1 — стенка резервуара; 2 — прокладка; 3 — днище; 4 — усиливающая накладка

Помимо перечисленных в табл. 1.3 и 5.1, в ряде специфических случаев применяют и другие методы, например радиоактивный, акустико-эмиссионный, электронозахватный, плазменный и др.

Для обнаружения течей могут одновременно или последовательно использоваться несколько методов течеискания. При контроле герметичности в обязательном порядке используют прежде всего методы, реализующие интегральную схему контроля. На практике наибольшее применение нашел манометрический метод, отличающийся максимальной простотой, доступностью и позволяющий установить наличие или отсутствие течи во всем объеме контролируемой конструкции, а также ее величину. Установление местоположения течей производят с использованием методов, реализующих локальную схему контроля. Ниже коротко рассматривается сущность некоторых из них.

Таблица 5.1

Методы течеискания	Пробное вещество	Индикация течи	Максимальная чувствительность, Вт
Масс-спектрометрический (гелиевый)	Гелий, гелиево-воздушная смесь	Увеличение показаний гелиевого течеискателя	10^{-14}
Галогенный	Хладоно(фреоно)-воздушные смеси	Увеличение показаний галогенного течеискателя	$1,3 \cdot 10^{-8}$
Пузырьковый	Воздух, азот, вакуум	Пузырьки при давлении 0,2...1 МПа	$6,6 \cdot 10^{-6} \dots 2,6 \cdot 10^{-9}$
Химический	Аммиачно-воздушные смеси, углекислый газ	Пятна на проявителе, индикаторной ленте, меловой массе	$1,3 \cdot 10^{-7} \dots 1,3 \cdot 10^{-8}$
Манометрический	Вода или технологическая жидкость	Течь, видимая невооруженным глазом, падение манометрического давления	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Люминесцентно-гидравлический	Вода и люминофор	Течь и свечение в лучах УФС	$6,6 \cdot 10^{-9}$
Гидравлический с люминесцентным покрытием	Вода	Свечение в лучах УФС	$6,6 \cdot 10^{-8}$
Акустический	Воздух, азот, вакуум	Увеличение звукового сигнала течеискателя	$6,6 \cdot 10^{-6}$

5.3. Масс-спектрометрический метод

Метод основан на создании повышенного парциального давления пробного вещества (газа) в смеси веществ с одной стороны поверхности объекта контроля и отбора проникающего через течи пробного вещества с другой стороны для масс-спектрометрического анализа на присутствие молекул пробного газа. Анализ осуществляется путем ионизации пробного вещества с последующим разделением ионов по отношению их массы к заряду под действием электрического и магнитного полей. Основные требования по проведению масс-спектрометрического неразрушающего контроля регламентированы ГОСТ 28517—80.

Благодаря серийному выпуску масс-спектрометрических течеискателей метод нашел широкое применение в практике промышленных испытаний. Метод позволяет помимо качественной оценки провести количественные измерения газового потока через течь с точностью до 10 %. Вместе с тем этот метод технически сложен, требует вакуума и по возможности его заменяют более простыми методами.

Масс-спектрометрический течеискатель состоит из трех основных частей: масс-спектрометрической камеры с магнитом, вакуумной системы и электрических блоков питания и измерения. Своей

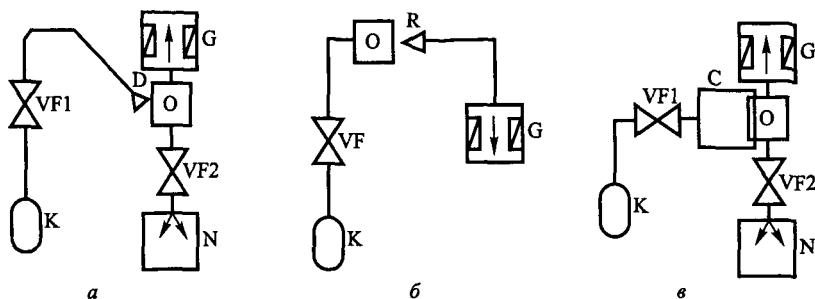


Рис. 5.3. Схемы способов реализации масс-спектрометрического метода течеискания: а — способ обдува; б — способ шупа; в — способ разъемных местных камер (чеклов); О — испытуемый объект; Г — течеискатель; R — шуп; VF — клапан регулировочный; N — насос; K — баллон с пробным газом; D — обдуватель; C — камера, наполненная пробным газом

вакуумной частью он может присоединяться к самому объекту или к шупу в зависимости от выбранной схемы контроля. ГОСТ 28517–80 предусматривает восемь схем реализации масс-спектрометрического метода течеискания. Некоторые из них приведены на рис. 5.3.

Наиболее эффективный и удобный метод обнаружения течей реализуется с помощью шупа, соединенного вакуумным резиновым шлангом с течеискателем. При методе обдувки пробным газом наружной поверхности изделия из него откачивается воздух до получения давления $10^{-5} \dots 10^{-8}$ МПа и изделие соединяется с вакуумной частью течеискателя.

Применяют также метод специальной камеры, который состоит в том, что на испытуемый участок изделия устанавливают герметичную камеру-муфту, соединенную с системой откачки и течеискателем. Воздух из камеры и изделия одновременно откачивают до необходимого вакуума. Затем в изделие под давлением подается пробный газ и после выдержки (не менее 3 мин) производится контроль. Этим методом контролируют течи трубопроводов и изделий небольшого диаметра.

В качестве пробного газа обычно используют гелий. Он обладает малой молекулярной массой и хорошо проникает через малые течи. Гелий химически инертен, дешев и безопасен в применении. В атмосферном воздухе он содержится в весьма малых количествах (10^{-4} %), поэтому фоновые эффекты при работе с ним сказываются значительно меньше, чем при применении других веществ. Кроме того, по соотношению массы иона к его заряду (m/e) гелий очень сильно (на 25 %) отличается от ближайших ионов других газов, что облегчает его обнаружение и выполнение измерений. Поэтому масс-спектрометрические течеискатели часто называют гелиевыми.

Схема масс-спектрометрической камеры течеискателя приведена на рис. 5.4 [3, 4]. Газы, подлежащие анализу, из испытываемого объекта или от шупа поступают в камеру ионизатора. От накального катода в камеру, находящуюся относительно катода под положитель-

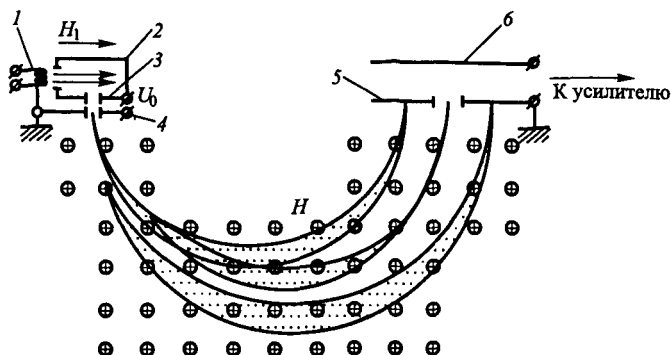


Рис. 5.4. Принципиальная схема масс-спектрометрической камеры течения:

1 — накаливаемый катод; 2 — камера ионизатора; 3, 4 — выходные диафрагмы; 5 — входная диафрагма; 6 — коллектор ионов

ным зарядом, направляется пучок отрицательно заряженных электронов, которые, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их. Фокусировка электронов при этом осуществляется магнитным полем напряженностью H_1 . Из образовавшихся в камере ионов с помощью диафрагмы формируется ионный пучок, который разгоняется благодаря разности потенциалов U_0 между диафрагмами 3 и 4.

Диафрагма 4 при этом электрически соединена с катодом и заряжена отрицательно относительно диафрагмы 3. Ионы пучка разгоняются до одинаковой энергии $\mathcal{E}$, которая определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{mv^2}{2} = eU_0,$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}},$$

где v — скорость ионов; e — заряд иона; m — масса иона.

Учитывая, что масса ионов различных компонентов анализируемого газа неодинакова, скорость ионов разных элементов также будет различаться. Далее ионы попадают в спектральную камеру, в которой действует магнитное поле напряженностью H , направленное перпендикулярно движению ионов. Под действием силы Лоренца $F_L = evH$, направление которой определяется по правилу левой руки, ионы будут перемещаться по траекториям в виде окружности радиусом R , а сама F_L при этом будет уравниваться центробежной силой.

Отсюда

$$\frac{mv^2}{R} = evH.$$

Выразив R и подставив v , получим

$$R = \frac{mv}{eH} = \frac{1}{H} \sqrt{2U_0} \frac{m}{e}.$$

Так как радиус траектории R зависит от отношения m/e , в спектральной камере ионный пучок разделяется на ряд пучков, соответствующих фиксированным значениям массовых чисел ($m_1, m_2, \dots, m_i$). Выделив пучок ионов пробного газа (гелия) диафрагмой и расположив за ней коллектор ионов, производят измерения интенсивности этого пучка и, соответственно, интенсивность течи (Вт).

Проведение течеискания масс-спектрометрическим методом включает следующие этапы: определение порога чувствительности аппаратуры и течеискания; подача пробного газа на (в) контролируемый объект; определение степени негерметичности объекта и (или) места течи; обработка и оценка результатов течеискания. Порог чувствительности течеискания должен контролироваться по калиброванным течам перед началом испытаний и в процессе их проведения в соответствии с технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

5.4. Галогенный и катарометрический методы

Галогенный метод течеискания основан на свойстве нагретой поверхности чувствительного элемента, изготовленного из платины или из никеля, резко увеличивать эмиссию положительных ионов при наличии в пробном газе, проникающем через сквозные дефекты контролируемого объекта, галогенов или галогеносодержащих веществ. На этом свойстве построен галогенный течеискатель, работа которого осуществляется следующим образом [3]: через чувствительный элемент течеискателя, выполняющий функции анода, прогоняют с помощью центробежного или вакуумного насоса анализируемый газ. Анод, нагретый до 800...900 °С, испускает ионы содержащихся в нем примесей щелочных металлов (натрия, калия). Под действием разности потенциалов между анодом и коллектором ионы движутся к коллектору. Ток анод—коллектор является измеряемой величиной в галогенном течеискателе.

Галогены способствуют процессу ионизации щелочных металлов, и их присутствие в пробном газе резко увеличивает ток анод—коллектор. К галогенам относятся элементы группы галоидов: фтор, хлор, бром, иод. Обычно в качестве пробного газа используют галогеносодержащие вещества: фреон (содержащий фтор), хладон, хлористый метил и др. Такие вещества относительно дешевы, безвредны и широко применяются в промышленности и в быту (например, в бытовых холодильниках).

Технология контроля галогенным течеискателем значительно проще, чем масс-спектрометрическим. Галогенный течеискатель сравнительно несложный и легкий прибор. Вместе с тем при проведении контроля в помещении необходима его тщательная вентиляция из-за возникновения повышенного фона, снижающего точность измерений. Недостатком метода является также возможность потери чувствительности — «отравления» анода течеискателя при попадании на него большого количества галогенов. Восстановление «отравленного» анода осуществляется прокачкой через течеискатель большого объема чистого воздуха при повышенном накале анода.

Катарометрический метод течеискания основан на регистрации разницы в теплопроводности газа, вытекающего через сквозные отверстия контролируемого объекта. Работающие на этом принципе течеискатели обладают высокой чувствительностью и минимальными размерами. Так, на рис. 5.5 приведен портативный течеискатель Pho Check 5000Ex, предназначенный для поиска утечек из резервуаров, сосудов и трубопроводов, а также для текущего контроля окружающей среды на присутствие летучих органических соединений.

Основным элементом течеискателя является сенсор, мгновенно определяющий изменение теплопроводности газа. При включении он автоматически калибруется по воздуху. Важным отличием течеискателя является его искробезопасное электрическое исполнение в соответствии с международным стандартом BASEEFA и возможность применения во взрывоопасных помещениях и средах.

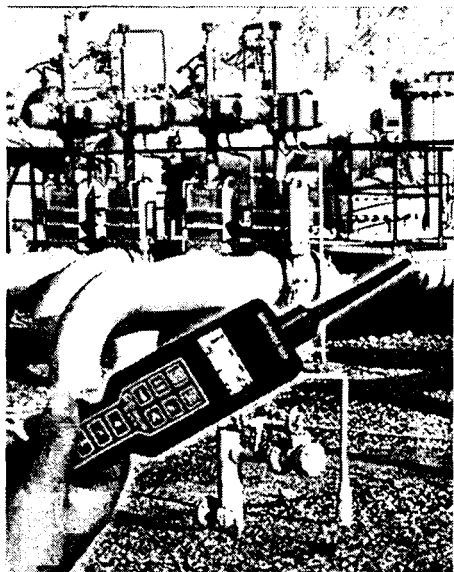


Рис. 5.5. Контроль окружающей среды с помощью катарометрического течеискателя

5.5. Жидкостные методы течеискания

Процесс гидроиспытаний, которому подвергаются большинство работающих под давлением объектов в нефтегазохимической промышленности, используют одновременно как способ течеискания. Таким способом обычно удается обнаружить большие течи. Индикация течей осуществляется визуально или по падению манометрического давления.

Для облегчения поиска течей и понижения порога чувствительности в пенетрант или пробную жидкость часто добавляют люминофоры.

К жидкостным методам течеискания с применением люминофоров относятся люминесцентно-гидравлический и гидравлический с люминесцентным покрытием. Оба метода реализуются одновременно с испытанием объекта контроля на прочность гидравлическим давлением. Их сущность заключается в обнаружении просочившихся или активированных водой капель люминофора при ультрафиолетовом облучении.

Люминесцентно-гидравлический метод осуществляется с применением в качестве пробного вещества раствора люминофора в воде, находящейся в испытуемом изделии под давлением. При проникновении пробного вещества через течи люминофор дает свечение при облучении УФС. Недостаток метода — необходимость обесцвечивания люминесцентного раствора перед сбросом его в канализацию.

При гидравлическом методе с люминесцентным индикаторным покрытием люминесценция при облучении УФС возбуждается в слое специального покрытия в случае проникновения в него через сквозные дефекты воды, находящейся в испытуемом объекте под давлением. Люминесцентное индикаторное покрытие содержит вещество, удерживающее проникающую в него воду и препятствующее ее испарению, поэтому метод требователен к влажности воздуха на участке испытаний и температуре воды, заливаемой в изделие.

Чувствительность обоих методов с применением люминофоров возрастает с увеличением давления внутри объекта.

Если гидроиспытания невозможны по технологическим причинам или из-за низкой прочности контролируемого объекта, для обнаружения течей применяют контроль проникающими веществами. Он отличается от рассмотренного в главе 4 тем, что пенетрант и проявитель наносят на разные стороны перегородки. Такой способ применяют, в частности, для контроля герметичности сварных швов вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. В соответствии с ПБ 03-605—03 контроль производят с использованием пробы «мел—керосин» путем обильного смазывания сварных швов керосином. На противоположной стороне сварного шва, предварительно покрытого водной суспензией мела или каолина, течи, при их наличии, проявляются в виде пятен на белом фоне после выдержки в течение не менее 1 ч. Метод с использо-

ванием пробы «мел—керосин» является наиболее технологичным при проверке герметичности уторного шва, соединяющего стенку с днищем и представляющего наибольшие сложности для инструментального контроля.

5.6. Акустический метод

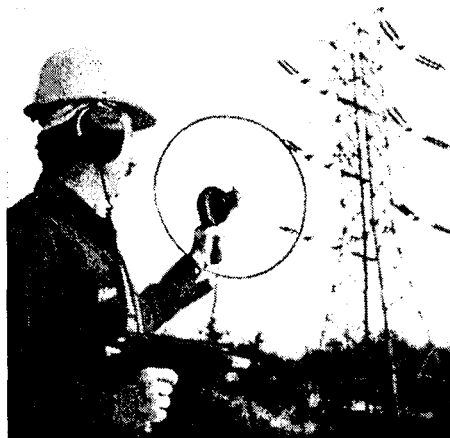
Этот метод основан на индикации акустических колебаний, возбуждаемых в контролируемом объекте, грунте или окружающей газовой среде (воздухе) при вытекании пробного газа или жидкости через сквозные дефекты. Молекулы пробного вещества взаимодействуют со стенками сквозных дефектов объекта и генерируют в нем колебания звукового и ультразвукового диапазонов. Эти колебания фиксируются с помощью устанавливаемого на поверхности объекта ультразвукового или виброакустического датчика течеискателя, преобразовывающего ультразвуковые колебания в электрические сигналы, передаваемые далее на показывающие и записывающие устройства течеискателя.

В настоящее время акустические методы течеискания занимают важнейшее место в контроле герметичности трубопроводов. Наиболее совершенными являются акустические корреляционные течеискатели, датчики которых устанавливают на концах контролируемого участка трубы. Акустические колебания, возникающие при истечении технологической среды и регистрируемые датчиками, усиливаются и по кабелю или радиоканалу передаются на программируемый процессор, где вычисляется их взаимная корреляционная функция. К их числу относится отечественный акустический корреляционный течеискатель Т-2001, разработанный фирмой ИНКОТЕС, позволяющий определить места утечек на расстоянии до 600 м между датчиками. Положение пика корреляционной функции, визуализируемой на экране течеискателя, определяет местоположение течи. Погрешность определения места утечки — 0,1 м на длине обследуемого участка 100 м. Для контроля герметичности емкостного технологического оборудования в качестве течеискателей могут использоваться комплекты акустико-эмиссионной аппаратуры, позволяющие путем планарной локации определять координаты течей (см. 10.4).

Генерация вибраций грунта или акустических колебаний окружающей газовой среды при протечке газа или жидкости через течи обусловлена превращением кинетической энергии струи в энергию упругих колебаний. Частотный спектр этих колебаний широк: от десятков герц до сотен килогерц. Он зависит от вида и размеров течи, параметров протекающего через нее вещества (плотности, температуры, давления и др.).

Принцип действия таких течеискателей основан на преобразовании вибрации грунта или колебаний газовой среды (воздуха) в элек-

*Рис. 5.6. Дистанционный контроль
коронных разрядов и пробоя
изоляции*



трические сигналы, частотной и амплитудной селекции этих сигналов. Непосредственного контакта датчика с объектом при этом не требуется. Например, в переносном акустическом искателе утечек в подземных трубопроводах «АИСТ-4» датчик в процессе контроля последовательно устанавливается на грунт вдоль трассы.

Выпускаются также универсальные приборы, имеющие сменные насадки и позволяющие контролировать колебания объекта как контактным методом, так и дистанционно. К ним относятся, например, ультразвуковые локаторы ULTRAPROBE, предназначенные для определения мест присосов и утечек газовых и жидкостных сред, дефектоскопии подшипников, мест искрения и коронных разрядов в электрооборудовании. На рис. 5.6 приведен рабочий момент дистанционного контроля состояния изоляторов ЛЭП с помощью ультразвукового локатора ULTRAPROBE™ 2000, снабженного параболической насадкой.

Все современные акустические течеискатели являются компактными переносными приборами, питаемыми от встроенных аккумуляторов. Мощность фиксируемых колебаний растет с увеличением давления и размера течи и уменьшением расстояния до нее. Чувствительность контроля может быть существенно повышена, если дефектную зону объекта смочить жидкостью, например водой. Вытекающий через течи газ образует пузырьки, при разрушении которых образуются мощные акустические импульсы.

Контроль акустическим методом не требует применения специальных пробных веществ и высокой квалификации исполнителей. Недостатком метода является относительно низкая чувствительность и влияние посторонних шумов различного происхождения.

6. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Радиационный неразрушающий контроль основан на использовании проникающих свойств ионизирующих излучений и является одним из наиболее эффективных и распространенных видов контроля. В нефтегазовой отрасли применяется прежде всего для контроля сварных соединений магистральных и промысловых трубопроводов, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, сосудов под давлением и других объектов. Реализация данного вида контроля предусматривает использование как минимум трех основных элементов: источника ионизирующего излучения; объекта контроля; детектора, регистрирующего результаты взаимодействия ионизирующего излучения с объектом контроля.

6.1. Источники ионизирующего излучения

В радиационном неразрушающем контроле используют три вида ионизирующих излучений: тормозное (x), гамма- (γ) и нейтронное (n).

Контроль с применением нейтронного излучения осуществляется только в стационарных условиях. Основными источниками нейтронного излучения являются ускорители заряженных частиц, ядерные реакторы и радиоактивные источники нейтронов. В полевых условиях при эксплуатации или строительстве объекта обычно используют x - или γ -излучения. Источниками x -излучения при этом служат переносные импульсные рентгеновские аппараты, а γ -излучения — радиоактивные источники. С их помощью можно просвечивать стальные изделия толщиной 1...200 мм.

Излучающим элементом рентгеновских аппаратов являются вакуумные двухэлектродные рентгеновские трубки. На электроды трубки (с холодным катодом) подается импульс высокого напряжения, создаваемый путем разряда накопительной емкости через повышающий высоковольтный трансформатор. Под действием этого импульса происходит электрический пробой вакуума и при торможении электронов на аноде возникают кратковременные (0,1...0,2 мс) вспышки рентгеновского x -излучения.

При диагностировании оборудования в полевых условиях для контроля металлоконструкций применяется переносная рентгеновская аппаратура «Арина-0,5», «Шмель» и др., позволяющая просвечивать стальные материалы толщиной 5...120 мм. Такая аппаратура состоит из трех основных частей: переносного (транспортибельного) блока — трансформатора с рентгеновской трубкой, переносного пульта управления чемоданного типа, комплекта соединительных

низковольтных кабелей, трубопроводов или шлангов, применяемых при охлаждении блока трансформатора.

Контрольно-измерительная часть представляет собой группу приборов, которые служат для измерения и регулирования времени, тока, напряжения и частоты. Величина высокого напряжения, подаваемого на электроды рентгеновской трубки, составляет 100...400 кВ. С увеличением напряжения осуществляется смещение максимума излучения в сторону коротких волн, увеличивается проникающая способность излучения.

Рентгеновский излучатель, помимо рентгеновской трубки, включает защитный кожух, заполненный изолирующей средой — трансформаторным маслом или газом под давлением, а также коллиматор — устройство, предназначенное для формирования пучка направленного излучения.

Радиоактивные источники γ -излучения применяются в гамма-дефектоскопии и поставляются в ампулах, транспортируемых в специальных контейнерах. В качестве радиоактивных источников обычно используются изотопы Co60 , Se75 , Ir192 . Появление таких сравнительно дешевых радиоактивных источников привело к созданию специальных комплектов оборудования, названных гамма-дефектоскопами. Различают гамма-дефектоскопы для фронтального и панорамного просвечивания, а также универсальные шланговые гамма-дефектоскопы. Гамма-дефектоскопы первого типа представляют собой лишь излучающую радиационную головку, устанавливаемую в зону контроля и снабженную механизмом открывания и закрывания затвора. Наибольшее применение нашли универсальные приборы шлангового типа, состоящие из радиационной головки, шланга-ампулопровода, пульта управления с механизмом перемещения ампулы с радиоактивным источником по ампулопроводу и коллимирующей насадки. В этих аппаратах ампула радиоактивного источника излучения из радиационной головки подается по ампулопроводу с помощью гибкого троса, приводимого от дистанционного пульта с ручным или электрическим приводом. Наличие дистанционного привода позволяет свести до минимума радиоактивное облучение оператора за счет его удаления от источника излучения на 12 м и более.

Структурная схема шлангового дефектоскопа приведена на рис. 6.1. На рис. 6.2 показаны радиационные головки некоторых отечественных шланговых дефектоскопов, а на рис. 6.3 — типовое оборудование гамма-дефектоскопии с дистанционным пультом управления. Основным элементом радиационных головок является защитный урановый кожух, смонтированный внутри корпуса и предназначенный для защиты обслуживающего персонала от радиоактивного излучения.

В табл. 6.1 приведены для сравнения основные характеристики современных отечественных шланговых гамма-дефектоскопов.

В отличие от рентгеновских аппаратов гамма-дефектоскопы могут эксплуатироваться без источников энергии, что особенно важно в полевых условиях. Их также часто применяют для контроля закры-

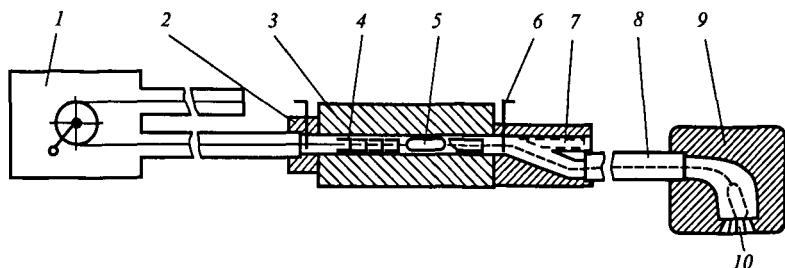


Рис. 6.1. Структурная схема шлангового гамма-дефектоскопа:

1 — дистанционный пульт управления; 2 — крышка с блокиратором; 3 — радиационная головка; 4 — ампулодержатель; 5 — ампула с радиоактивным источником; 6 — блокиратор; 7 — защитный урановый стержень; 8 — шланг; 9 — коллимирующая насадка; 10 — фильтр коллимирующей насадки

тых объектов сложной формы, когда невозможно установить излучатели рентгеновских аппаратов. Недостатками гамма-дефектоскопов являются: необходимость периодической замены источников излучения, потерявших активность, ограниченные возможности по регулированию режимов работы, а также более низкий контраст радиографических снимков по сравнению с рентгеновскими.

Таблица 6.1

Наименование	Марка гамма-дефектоскопа			
	РИД-Se4P	РИД-ИС/120P	РИД-К/100	ГАММАРИД 192/120МД
Тип радиоактивного изотопа	Se75	Se75 или Ir192	Co60	Ir192
Период полураспада изотопа	~ 120 дн.	Se75 ~ 120 дн. Ir192 ~ 74 дн.	5,25 г	~ 74 дн.
Эффективная энергия гамма-излучения, МэВ	~ 0,215	Se75 ~ 0,215 Ir192 ~ 0,407	1,25	~ 0,407
Оптимальный диапазон толщин контролируемого металла (сталь), мм	5...30	5...80	30...200	20...80
Перемещение источника излучения по ампулопроводу: по горизонтали, м по вертикали, м	До 8,0 До 4,0	До 8,0 (12) До 4,0	До 8,0 До 4,0	До 8,0 До 4,0
Интервал рабочих температур, °С	-50...+50	-40...+45	+1...+45	-50...+50
Габаритные размеры радиационной головки, мм	224 × 100 × 175	320 × 122 × 205	450 × 270 × 320	240 × 110 × 110
Масса радиационной головки, кг	7	~ 23	152	19

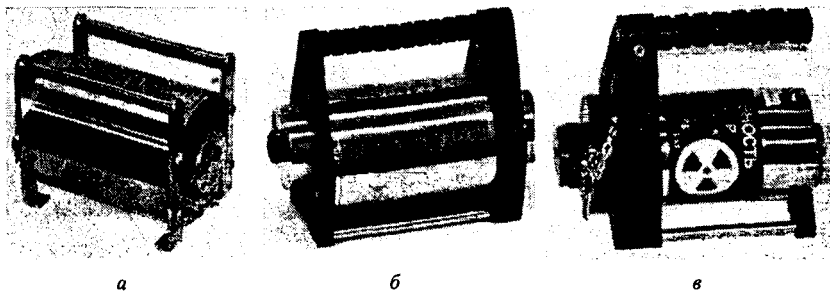


Рис. 6.2. Радиационные головки шланговых гамма-дефектоскопов:

а — дефектоскоп РИД-К/100; *б* — дефектоскоп РИД-ИС/120Р;
в — дефектоскоп РИД-Se4P

Ионизирующие излучения в целом с точки зрения воздействия на организм человека являются наиболее опасными из числа используемых в неразрушающем контроле, поэтому вся аппаратура, применяемая при радиационном контроле, подлежит обязательной сертификации и периодической переаттестации. К работе допускается специально обученный и аттестованный персонал, который подвергается обязательному дозиметрическому контролю.

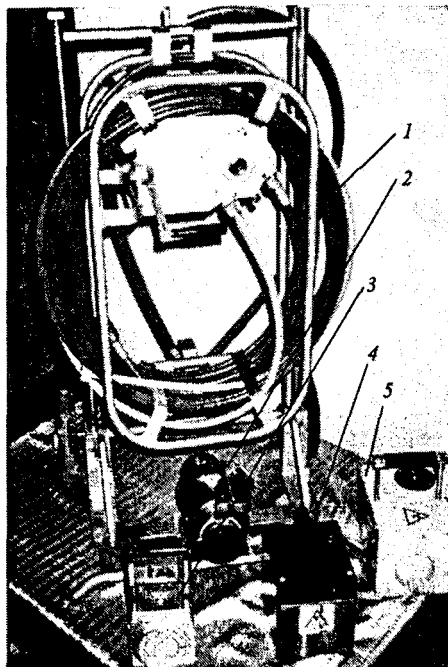


Рис. 6.3. Оборудование для гамма-дефектоскопии:

1 — дистанционный пульт управления и ампулопровод шлангового гамма-дефектоскопа ГАММАРИД 192/120;
2 — радиационная головка ГАММАРИД 192/120; *3* — фронтальный гамма-дефектоскоп СТАПЕЛЬ-5М; *4* — фронтальный гамма-дефектоскоп СТАПЕЛЬ-20;
5 — фронтальный гамма-дефектоскоп СТАПЕЛЬ-20М

6.2. Контроль прошедшим излучением

Из числа радиационных методов (см. табл. 1.2) для обнаружения и измерения внутренних дефектов в изделии используются методы прошедшего излучения. При прохождении через контролируемое изделие ионизирующее излучение ослабляется за счет его поглощения и рассеяния в материале изделия. Степень ослабления зависит от толщины изделия, химического состава и структуры материала, наличия в нем газовых полостей, сульфидных раскатов и других инородных включений. В результате прохождения изделия детектором фиксируется распределение интенсивности дошедшего до него потока излучения, называемого радиационным изображением изделия. Наличие и характеристики дефектов определяют по плотности полученного радиационного изображения. Равномерная интенсивность излучения, дошедшего до детектора, свидетельствует об отсутствии дефектов. Уменьшение плотности радиационного изображения соответствует увеличению толщины контролируемого изделия, например в зоне сварных швов или брызг (капелек) металла от сварок. В свою очередь увеличение плотности соответствует участкам изделий с меньшей радиационной толщиной, имеющих дефекты. Схема радиационного контроля методом прошедшего излучения приведена на рис. 6.4.

Интенсивность доходящего до объекта излучения Φ_0 зависит от исходного потока в точке выхода излучения Φ_a , расстояния a до объекта и особенностей самого излучения:

$$\Phi_0 = \frac{R\Phi_a}{a + b},$$

где R и b — константы, определяемые природой излучения.

После прохождения объекта интенсивность попадающего на детектор излучения определится из выражения

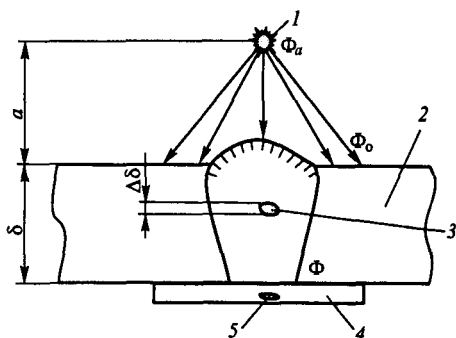


Рис. 6.4. Схема радиационного контроля методом прошедшего излучения:

1 — источник излучения; 2 — объект контроля; 3 — дефект; 4 — детектор (кассета с пленкой); 5 — след от дефекта

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\mu\delta)B,$$

где μ — коэффициент ослабления излучения материалом объекта; δ — толщина объекта; B — фактор так называемого накопления, определяемый экспериментально (при узком пучке лучей $B \sim 1$).

В связи с экспоненциальной зависимостью затухания интенсивности ионизирующего излучения чувствительность контроля резко уменьшается с увеличением радиационной толщины, поэтому максимальная глубина контроля ограничена и для переносных аппаратов обычно не превышает 200 мм, что является одним из недостатков радиационного метода контроля.

Кроме того, весьма существенным недостатком является то, что трещины, радиационная толщина которых меньше заданного класса чувствительности, при радиационном методе контроля не выявляются. В первую очередь это относится к трещинам, ориентированным перпендикулярно или под малым углом к направлению ионизирующего излучения.

Методы радиационного контроля прошедшим излучением различаются способами детектирования результатов взаимодействия излучения с объектом контроля и, соответственно, делятся на радиографические, радиоскопические и радиометрические.

Радиографический метод неразрушающего контроля основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или записи этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. Для получения радиографических снимков используют кассеты со специальной радиографической (рентгеновской) пленкой, снабженные для повышения чувствительности усиливающими экранами. В качестве детекторов радиационного изображения используются также полупроводниковые пластины, с которых изображение методом ксерорадиографии переносится на обычную бумагу.

Радиоскопический метод радиационного контроля основан на регистрации радиационного изображения на флуоресцирующем экране или на экране монитора электронного радиационно-оптического преобразователя. Достоинством радиоскопического метода является возможность одновременного контроля изделия под разными углами и, соответственно, стереоскопического видения дефектов. При радиометрическом методе радиационное изображение преобразуется посредством сканирования в цифровую форму и фиксируется на соответствующем носителе информации — диске, магнитной ленте. В дальнейшем эта информация переносится в компьютер для последующей обработки и анализа.

Для целей технической диагностики эксплуатируемого оборудования применяют радиографический метод контроля, реализуемый посредством относительно простого переносного комплекта оборудования, позволяющего получить документальное подтверждение результатов контроля в виде радиографического снимка.

6.3. Радиографический контроль сварных соединений

Сварные соединения чаще всего являются наиболее слабым звеном металлоконструкции, поэтому их контролируют в первую очередь. Радиационному контролю подвергают сварные соединения с отношением радиационной толщины (толщина в направлении ионизирующего излучения) наплавленного металла шва к общей радиационной толщине не менее 0,2, имеющие двусторонний доступ, что обеспечивает возможность установки кассеты с радиографической пленкой с одной стороны и источника излучения с другой. Тип источника, его удаление от объекта контроля, время экспозиции и другие параметры устанавливаются в зависимости от толщины просвечиваемого материала и технической документации на контроль сварных соединений.

Основные схемы контроля стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых соединений приведены на рис. 6.5, а. Наибольшую слож-

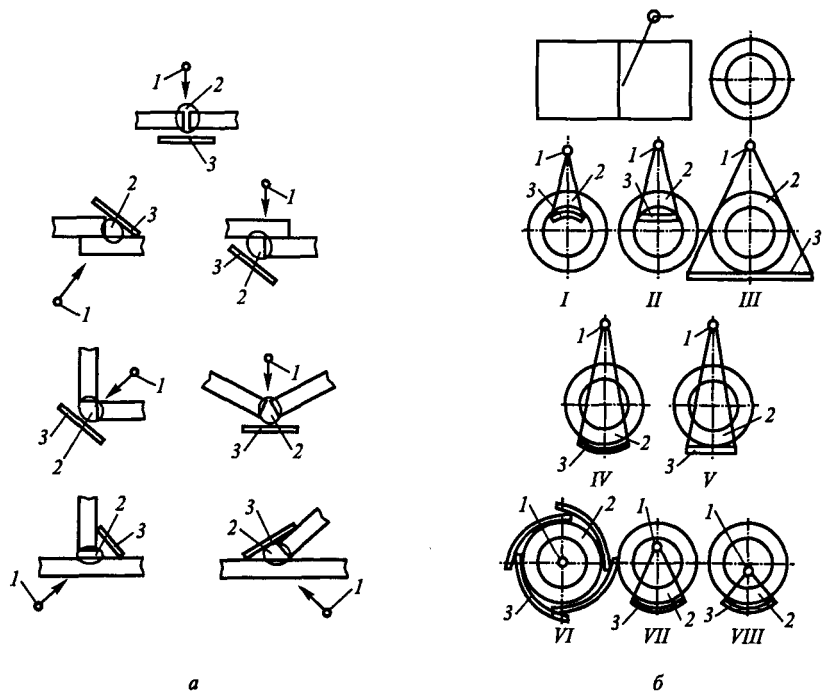


Рис. 6.5. Схемы контроля:

а — стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых сварных соединений; б — кольцевых сварных соединений; 1 — источник излучения; 2 — контролируемый участок; 3 — кассета с пленкой

ность представляет контроль кольцевых сварных соединений цилиндрических и сферических пустотелых изделий (труб, сосудов под давлением, бочек и т.п.). Рекомендуемые схемы контроля кольцевых сварных соединений по ГОСТ 7512–82 приведены на рис. 6.5, б: *I, II* — просвечивание через одну стенку с наружным расположением источника излучения; *III, IV, V* — просвечивание через две стенки; *VI, VII, VIII* — просвечивание с расположением источника излучения внутри контролируемого объекта. Для обеспечения лучшего качества радиографических снимков следует, как правило, использовать схемы просвечивания через одну стенку изделия. При этом рекомендуется применять схемы просвечивания с расположением источника излучения внутри контролируемого изделия.

Радиографический контроль следует проводить после зачистки сварных соединений от неровностей, шлака, брызг металла, окалины и других наружных дефектов, выявленных при внешнем осмотре сварного соединения, изображения которых на снимке могут мешать расшифровке снимка. Каждый снимок участка контролируемого соединения должен иметь маркировку.

Чувствительность радиографического контроля оценивается величиной минимально выявляемого дефекта в направлении просвечивания. Достижимая на практике чувствительность составляет 2 % от толщины изделия при просвечивании рентгеновским излучением и 5 % при просвечивании гамма-излучением [12]. В общем случае чувствительность радиографического контроля зависит от энергии излучения, плотности ее распределения в пределах контролируемого участка и общей нерезкости радиографического снимка.

Общая нерезкость при радиографическом контроле характеризуется размытостью краев изображения на снимке. Величина общей нерезкости зависит от следующих ее составляющих: геометрической нерезкости, внутренней нерезкости излучения, нерезкости рассеяния излучения, нерезкости смещения (возникает в случае колебания при просвечивании источника излучения, объекта контроля и детектора). Наибольший вклад в общую нерезкость изображения вносит обычно геометрическая нерезкость, схема образования которой приведена на рис. 6.6.

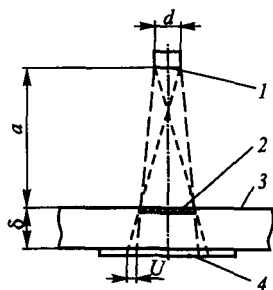


Рис. 6.6. Схема образования геометрической нерезкости при радиографическом контроле: 1 — источник излучения; 2 — дефект; 3 — объект контроля; 4 — кассета с пленкой

Размытость краев изображения, обусловленная геометрической нерезкостью, оценивается величиной U , определяемой из выражения

$$U = d\delta/a,$$

где d — длина источника излучения; a — расстояние до объекта; δ — толщина объекта.

При радиографическом контроле на каждом контролируемом участке объекта должны быть установлены эталоны чувствительности и маркировочные знаки идентификации снимка. Эталоны чувствительности служат для оценки изменения интенсивности излучения, которое может быть обнаружено с заданной вероятностью данным методом контроля. Эталоны чувствительности радиационного контроля представляют собой тест-образцы с заданным значением контролируемого параметра (радиационной толщины) и бывают проволоочные, канавочные и пластинчатые. Чувствительность контроля при использовании проволоочных эталонов определяется наименьшим диаметром проволоки, при котором на снимке выявляются отверстия (дефекты) диаметром, равным удвоенной толщине проволоочного эталона. Конструкция и размеры проволоочных эталонов по ГОСТ 7512–82 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод» приведены на рис. 6.7.

Маркировочные знаки, используемые для нумерации контролируемых участков, следует устанавливать на объекте или непосредственно на кассете таким образом, чтобы изображения маркировочных знаков на снимках не накладывались на изображение шва или око-

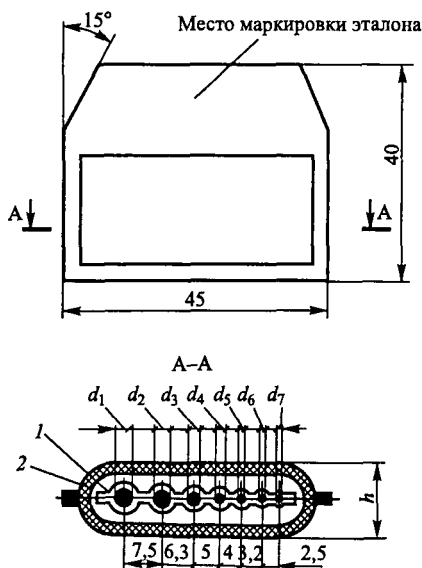


Рис. 6.7. Проволоочный эталон чувствительности:

1 — вкладыш; 2 — чехол

лошовной зоны. Эталоны чувствительности устанавливают, как правило, на контролируемом участке сварного соединения со стороны, обращенной к источнику излучения. Для просмотра и расшифровки радиографических снимков используют специальные подсвечивающие устройства — негатоскопы со световыми матовыми экранами. Длину и ширину дефекта на снимке определяют с помощью измерительных линеек или измерительных луп. Глубину дефектов по сечению шва определяют путем оценки затемнения (плотности) снимка с помощью денситометров, наборов оптических плотностей или путем сравнения затемнения дефекта с затемнением соответствующей проволоочки или канавки на эталоне чувствительности.

Используемые при контроле денситометры, наборы оптических плотностей, эталоны чувствительности и измерительные инструменты подлежат периодической метрологической поверке.

Помимо обнаружения внутренних дефектов радиографический контроль может быть использован для толщинометрии конструкций. Для этого проводят измерения плотности снимка в поперечном сечении контролируемого изделия. Границы, определяющие толщину стенки, выделяются на снимке резким изменением плотности. В ряде случаев радиационная толщинометрия является единственным методом определения остаточной толщины конструкции без ее повреждения. Например: неразборные теплообменники типа «труба в трубе», трубы в изоляции, трубы, покрытые плакирующим металлом (биметаллические), и т.д.

7. МАГНИТНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

7.1. Область применения и классификация

Магнитное поле является материальным продолжением тела за пределы его молекулярной структуры и обнаруживается по многочисленным проявлениям. Наиболее известными из них являются его индукционное и электрическое действия, которые можно измерить и использовать для целей неразрушающего контроля.

Магнитный вид неразрушающего контроля применяют в основном для изделий из ферромагнитных материалов. Магнитные характеристики таких материалов являются информативными параметрами, так как зависят от их физико-механических свойств, химического состава, вида механической и термической обработки, а также от размеров и сплошности изделий.

К числу информативных параметров, используемых в магнитном неразрушающем контроле (НК), относятся: коэрцитивная сила H_c , намагниченность M , остаточная магнитная индукция B_r , начальная или максимальная магнитная проницаемость μ , параметры петли гистерезиса $B(H)$, параметры скачков Баркгаузена, параметры магнитооптического эффекта и др. (см. табл. 1.2).

По способу получения первичной информации различают следующие методы магнитного контроля:

- магнитопорошковый (МП), основанный на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или магнитной суспензии;
- магнитографический (МГ), основанный на регистрации магнитных полей рассеяния с использованием в качестве индикатора ферромагнитной пленки;
- феррозондовый (ФЗ), основанный на измерении напряженности магнитного поля феррозондами;
- эффекта Холла (ЭХ), основанный на регистрации магнитных полей датчиками Холла;
- индукционный (И), основанный на регистрации магнитных полей рассеяния по величине или фазе индуктируемой ЭДС;
- пондеромоторный (ПМ), основанный на регистрации силы отрыва (притяжения) постоянного магнита или сердечника электромагнита от контролируемого объекта;
- магниторезисторный (МР), основанный на регистрации магнитных полей рассеяния магниторезисторами;
- магнитооптический (МО), основанный на визуализации доменной структуры материала с помощью феррит-гранатовой пленки с зеркальной подложкой.

С помощью перечисленных методов можно осуществить контроль сплошности (МП, МГ, ФЗ, ЭХ, И, МР, МО), размеров (ФЗ, ЭХ, И, ПМ), структуры и физико-механических свойств (ФЗ, ЭХ, И, МО).

Ниже рассматриваются физическая сущность магнитного контроля и некоторые из методов, наиболее часто применяемые в практике технического диагностирования объектов нефтегазовой промышленности.

7.2. Магнитные характеристики ферромагнетиков

Ферромагнитные материалы относятся к веществам, которые под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля способны намагничиваться. При этом они сами в окружающем пространстве создают магнитное поле. Степень намагниченности определяется вектором намагниченности M , который пропорционален вектору напряженности H поля, создаваемого ферромагнетиком. Количественно намагниченность, А/м, определяется из выражения

$$M = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum m}{V},$$

где V — объем вещества; m — элементарный магнитный момент.

Степень намагниченности M различных материалов под воздействием одного и того же намагничивающего поля напряженностью H неодинакова. Она зависит от вида материала и его состояния (температура, наличие структурных повреждений и т.д.). Для количественной оценки способности вещества намагничиваться в магнитном поле вводят безразмерную характеристику — магнитную восприимчивость χ_m . Для изотропного вещества, свойства которого одинаковы во всех направлениях, связь между намагниченностью M и напряженностью магнитного поля H устанавливается соотношением

$$\chi_m = \frac{M}{H}.$$

Напряженностью магнитного поля H (векторная величина) называется сила, с которой единичный полюс в данной точке пространства отталкивается или притягивается. Напряженность магнитного поля равна силе, отнесенной к единичному полюсу, $H = F/m$; в системе СИ она измеряется в А/м. Поле, созданное в веществе, ориентирует его элементарные магниты, и в окружающем пространстве возникает магнитная индукция (влияние) B .

Магнитной индукцией называется силовая (векторная) характеристика магнитного поля, складывающаяся из индукции внешнего на-

магнитного поля ($\mu_0 H$) и индукции поля, создаваемого ферромагнетиком ($\mu_0 M$):

$$B = \mu_0 (H + M),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная (магнитная проницаемость пустоты).

Магнитная индукция B является основной характеристикой магнитного поля, определяющей его величину и направление. В международной системе единиц СИ магнитная индукция измеряется в теслах (Тл). Являясь по определению плотностью магнитного потока, она описывается также уравнением

$$B = \Phi / S,$$

где Φ — магнитный поток, измеряемый в веберах (Вб), проходящий через контур; S — площадь контура, м², в направлении, перпендикулярном Φ .

Приняв $M = \chi_m H$, получим

$$B = \mu_0 (H + \chi_m H) \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu H.$$

Величина $\mu = 1 + \chi_m$ называется *относительной магнитной проницаемостью*, она является безразмерной физической величиной, характеризующей магнитные свойства ферромагнетиков. Чем больше проницаемость, тем меньше магнитное сопротивление R , которое обратно пропорционально магнитной проницаемости, т. е. $R = 1/\mu$.

Величины χ_m , μ и R не являются константами и определяются по сложной зависимости. Так, магнитную проницаемость определяют по кривой, представленной на рис. 7.1 [2]. Различают начальную $\mu_{нач}$, максимальную μ_{max} и дифференциальную μ_d магнитную проницаемость:

$$\mu_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}; \quad \mu_d = \frac{dB}{\mu_0 dH}.$$

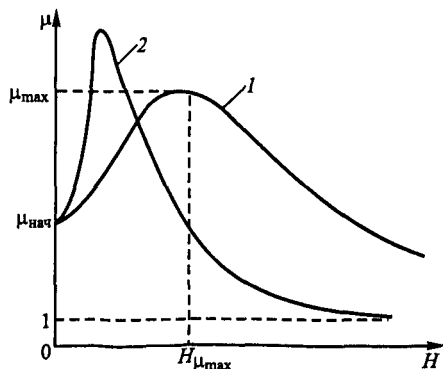


Рис. 7.1. Зависимость магнитной проницаемости μ (1) и дифференциальной магнитной проницаемости μ_d (2) от напряженности поля H

В зависимости от величины χ_m все вещества делят на три класса: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

У диамагнетиков $\chi_m < 0$; у парамагнетиков $\chi_m > 0$; у ферромагнетиков $\chi_m \gg 0$ (10^4 и более).

Ферромагнетики отличаются от парамагнетиков рядом свойств:

- кривая намагничивания, выражающая зависимость между H и B , для парамагнетиков будет прямой, для ферромагнетиков из-за непостоянства μ она имеет сложный характер;

- магнитная восприимчивость ферромагнетиков при некоторой температуре, называемой температурой Кюри (точкой Кюри), исчезает: ферромагнетик размагничивается и превращается в парамагнетик;

- кривые намагничивания и перемагничивания ферромагнетика не совпадают — происходит своеобразное отставание изменения индукции от изменений напряженности намагничивающего поля. Это явление называют гистерезисом, а замкнутая кривая, изображающая зависимость B от H при перемагничивании, называется петлей гистерезиса (рис. 7.2).

На зависимости B от H выделяют ряд характерных точек, имеющих соответствующие названия.

Магнитной индукцией насыщения B_s называют индукцию, соответствующую максимуму M . Дальнейшее увеличение B с ростом H осуществляется только за счет роста H , так как $B = \mu(H + M)$.

В зависимости от достигнутой величины индукции при перемагничивании различают предельную и частную петли гистерезиса. Предельная петля соответствует намагничиванию материала до на-

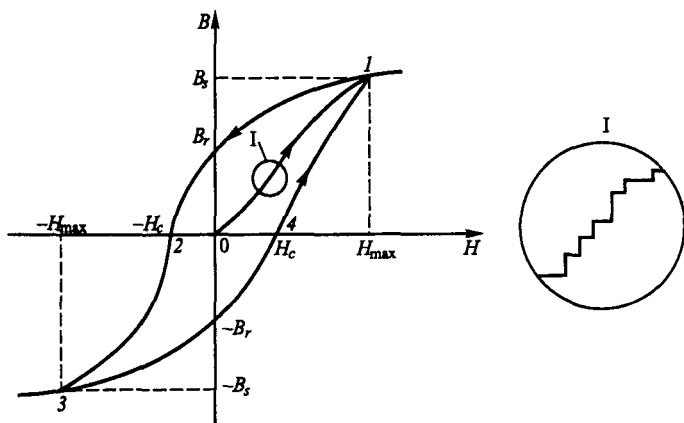


Рис. 7.2. Петля магнитного гистерезиса:

0—1 — первоначальная кривая намагничивания из размагниченного состояния;

1—2 — нисходящая ветвь; 4—1 — восходящая ветвь;

1—2—3—4—1 — предельная петля гистерезиса

сыщения B_s . Все остальные петли называются частными гистерезисными циклами, получаемыми при меньших, чем $H_{\max}$, напряженностях поля.

Остаточной магнитной индукцией B_r называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения материале после снятия магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c (от латинского *coercitio* — удерживание) — напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного до насыщения ферромагнетика (получения $B = 0$ по предельной петле гистерезиса). Магнитные свойства ферромагнетиков (в первую очередь сталей) определяются их химическим составом. Так, введение никеля, марганца, углерода, азота и меди уменьшает начальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{нач}}$ и повышает коэрцитивную силу H_c . Одновременное введение кремния, хрома, молибдена, ниобия, вольфрама и ванадия увеличивает $\mu_{\text{нач}}$ и уменьшает H_c . Между начальной магнитной проницаемостью $\mu_{\text{нач}}$ и коэрцитивной силой H_c для сталей существует обратно пропорциональная зависимость. Так, для диапазона значений $H_c = 0, 2 \dots 5$ кА/м и $\mu = 10 \dots 270$ установлена зависимость $\mu_{\text{нач}} = (0,17H_c)^{-1}$ (см.: Богачева Н. Д. Расширение возможностей применения метода коэрцитивной силы // В мире неразрушающего контроля. — М., 2005 г. — № 2. — С. 8—10).

Свойства ферромагнетиков объясняются наличием в них равномерно расположенных самопроизвольно намагниченных до точки насыщения доменов (объемов), разделенных граничным переходным слоем (домен — от французского *domiane* — владение, область, сфера). Размеры доменов колеблются в пределах $(0,005 \dots 0,5)10^{-3}$ м, толщина граничного слоя $(0,25 \dots 0,35)10^{-7}$ м. Векторы намагниченности каждого из доменов направлены вдоль так называемых направлений легкого намагничивания. Намагниченность соседних доменов направлена либо встречно, либо под углом 90° . Это связано с тем, что направлением легкого намагничивания ферромагнетика является ребро куба кристаллической решетки (для железа) или пространственная диагональ куба (для никеля). Ввиду хаотичности направлений этих векторов при отсутствии внешнего магнитного поля общая намагниченность всего объема материала равна нулю.

При помещении ферромагнетика в магнитное поле границы между доменами начинают смещаться и векторы их намагниченности разворачиваются по направлению намагничивающего поля, в результате чего ферромагнетик намагничивается.

При изменении намагничивающего поля доменные границы смещаются скачками, так как для их смещения необходимо преодолеть некоторый энергетический уровень. При этом, в соответствии с законом сохранения энергии, увеличивается энергия граничного слоя между доменами. Такие скачки можно увидеть при большом (10^9) увеличении кривой намагниченности (см. рис. 7.2). Этот эф-

фekt открыт в 1919 г. немецким ученым Генрихом Баркгаузенoм и носит его имя. Параметры скачков Баркгаузена (их число, форма и длительность, спектральное распределение) используют для контроля качества и свойств материалов. Этот метод применяют к тонким лентам и листам, так как при большой массе намагничиваемого материала скачки сливаются в сплошной шум. Вместе с тем установлено, что ЭДС магнитных шумов перемагничивания связана не только с массой намагничиваемого материала, но и с уровнем действующих в нем напряжений. Эта зависимость используется для контроля уровня остаточных и приложенных напряжений в деталях из ферромагнитных материалов. Например, в магнитно-шумовом приборе ПИОН-01 регистрация ЭДС магнитных шумов перемагничивания осуществляется с помощью накладного преобразователя, последовательно размещаемого вдоль направлений действия главных напряжений. Прибор успешно применяется не только при контроле напряженно-деформированного состояния, но и ударной вязкости КСЧ металла стальных подземных газопроводов (см., например, РД 12-411-01).

В области, приближающейся к B_s , процессы смещения границ между доменами и вращения векторов их намагниченности заканчиваются, и дальнейшее незначительное увеличение B , происходит за счет поворота магнитных моментов атомов под действием магнитного поля.

В качестве первичных информативных параметров при магнитном неразрушающем контроле чаще всего используют B_s , B_r и H_c .

7.3. Магнитные преобразователи

В подавляющем большинстве случаев при магнитном контроле приходится иметь дело с измерением или индикацией магнитных полей вблизи поверхности изделий. Для этого применяют различные магнитные преобразователи [2], из которых наиболее широкое распространение получили индукционные, феррозондовые, холловские и магниторезисторные. В магнитопорошковых и магнитографических установках применяют различные порошки и ленты.

Индукционные преобразователи. Принцип действия индукционного преобразователя основан на возникновении ЭДС, наведенной в замкнутом контуре, пропорциональной изменению во времени сцепления этого контура с магнитным потоком (магнитный поток равен произведению напряженности поля H на площадь поверхности, перпендикулярной вектору H . Величина H в пределах площади S может быть как постоянной (однородной), так и переменной). Простейший пассивный индукционный преобразователь представляет собой катушку (контур) с числом витков w . При помещении катуш-

ки в переменное магнитное поле на ее концах возникает мгновенная электродвижущая сила, определяемая по формуле

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

где $d\Phi$ — изменение сцепления магнитного потока за малый промежуток времени dt .

Полный магнитный поток, проходящий через катушку:

$$\Phi = BS \cos \alpha = \mu_0 \mu H S \cos \alpha,$$

где S — площадь катушки; α — угол между осью катушки и вектором магнитной индукции B .

Отсюда

$$E = -w \mu_0 \mu S \cos \alpha \frac{dH}{dt}.$$

Из последней формулы следует, что для повышения чувствительности измерения можно увеличить число витков или площадь катушки. Однако размеры катушки должны быть достаточно малы, чтобы магнитное поле в ней можно было считать однородным и не утратить точность измерений. Поэтому такие катушки наматывают тонким проводом в один слой, чтобы можно было пренебречь толщиной намотки по сравнению с диаметром катушки. В слабых полях для увеличения ЭДС внутри катушки помещают ферромагнитный сердечник для увеличения магнитной индукции B .

Вместе с тем при отсутствии градиента напряженности магнитного поля (при $dH/dt = 0$), т. е. для постоянных и однородных полей, пассивные индукционные преобразователи не могут быть использованы.

Феррозонды. В отличие от пассивных индукционных преобразователей феррозондовые преобразователи (феррозонды) являются устройствами активного типа. Происходящие в них процессы всегда связаны с воздействием двух полей — внешнего измеряемого поля и дополнительного вспомогательного поля возбуждения, образуемого за счет тока, протекающего в одной из обмоток. Простейший феррозонд состоит из сердечника с двумя обмотками — возбуждения и индикаторной. Схема такого феррозонда аналогична схеме накладного трансформаторного вихретокового преобразователя (см. рис. 8.1). С помощью первой обмотки создается поле возбуждения $H_n(t)$, в сердечнике возникает индукция $B(t)$, которая индуцирует магнитную ЭДС:

$$e = -w_n S \frac{dB}{dt},$$

где w_n — число витков измерительной обмотки; S — площадь сердечника.

Выбором размеров сердечника и максимальной напряженности поля возбуждения добиваются необходимой чувствительности либо необходимого диапазона измеряемых полей. При импульсном возбуждении возбуждение и индикацию можно осуществить одной обмоткой.

Существуют феррозонды различных типов и модификаций, отличающиеся количеством и расположением обмоток и конструкцией сердечника.

Магнитодоменные преобразователи. Действие магнитодоменных преобразователей основано на магнитооптическом эффекте Фарадея. Преобразователь представляет собой однородную магнитную среду определенной толщины, в которой существуют доменно-однородные области, обладающие одинаковой намагниченностью. В качестве такой среды применяют феррит-гранатовую пленку с зеркальной подложкой. Информативным параметром магнитодоменного преобразователя является видимое изображение доменной структуры на пленке.

В исходном размагниченном состоянии домены на пленке располагаются хаотично. При размещении пленки на поверхности контролируемого изделия из ферромагнитного материала домены перемещаются в плоскости пленки в зависимости от магнитного поля рассеяния, создаваемого дефектами. Топография доменной структуры пленки визуализируется с помощью оптической установки под увеличением при подсветке пленки плоскополяризованным светом.

В настоящее время магнитодоменные преобразователи находят пока ограниченное применение.

Датчики Холла. Датчики Холла, которые иногда называют преобразователями или генераторами Холла, работают по принципу возникновения ЭДС в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках. В 1879 г. американский физик Эдвин Г. Холл обнаружил, что в плоском проводнике, по которому в продольном направлении идет электрический ток, помещенном в магнитное поле, направление индукции которого перпендикулярно плоскости проводника, возникает разность потенциалов на его узких сторонах в точках *A* и *B* (рис. 7.3). Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца, возникающей при движении заряда в магнитном поле и направленной перпендикулярно векторам движения заряда и индукции магнитного поля.

Напряжение между точками *A* и *B* (на выходе датчика на рис. 7.1) определяют по формуле

$$U_y = R_H \frac{I_x B_z}{h},$$

где R_H — постоянная материала, известная как постоянная Холла, Ом·м/Тл; I_x — управляющий ток, А; B_z — магнитная индукция, Тл; h — толщина пластины датчика, м.

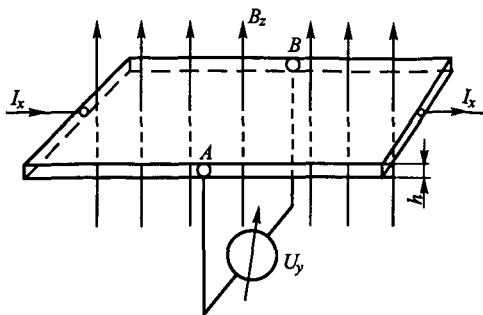


Рис. 7.3. Схема работы датчика Холла

Для изготовления датчиков Холла применяют обычно полупроводники, где величина R_H имеет максимальную величину. Отечественная промышленность серийно выпускает кремниевые, германиевые и арсенид-галлиевые преобразователи Холла. Конструктивно датчики Холла представляют собой пластины прямоугольной или крестообразной формы. Толщина пластин около 0,2 мм, размеры активной части от $1,8 \times 6$ до 6×3 мм. Пластины помещают в защитную оболочку из слюды, при этом их габаритные размеры увеличиваются примерно вдвое.

Магниторезисторы. В магниторезисторах используется эффект изменения сопротивления проводника или полупроводника с электрическим током при действии на них магнитного поля соответствующей напряженности. Таким эффектом обладает ряд материалов: антимонид и арсенид индия и галлия (InSb, InAs, GaSb, GaAs), германий (Ge), висмут (Bi), теллур (Te), селенид ртути (HgSe) и др. Чувствительность по напряжению магниторезисторов к слабым магнитным полям меньше, чем у датчиков Холла, поэтому их чаще используют при измерении сильных магнитных полей с индукцией свыше 0,2 Тл.

Магнитные порошки. Магнитные порошки используют для визуализации магнитных полей рассеяния на поверхности контролируемого объекта в зоне дефектов. На частицу ферромагнитного порошка, помещенного в такое поле, будет действовать сила, удерживающая его в зоне дефекта. Эта сила прямо пропорциональна градиенту напряженности dH/dx магнитного поля рассеяния:

$$F = \chi_m V H dH/dx,$$

где χ_m — магнитная восприимчивость материала порошка; V — объем частицы порошка.

Во внешнем намагничивающем поле частицы порошка существуют не изолированно, а коагулируются и образуют цепочки, что соответственно увеличивает удерживающую силу F . Длина цепочки определяется рядом факторов: вязкостью порошка и размером его

частиц, напряженностью магнитного поля, шероховатостью поверхности объекта контроля и др.

Магнитные порошки, используемые в магнитопорошковой дефектоскопии, могут быть как сухие, так и мокрые, работающие в водной среде, среде керосина или масла с минимальной вязкостью. Для повышения подвижности частиц порошка и чувствительности магнитопорошкового метода применяют магнитные суспензии, представляющие собой взвесь тонкоизмельченного порошка (0,1...60 мкм) в жидкой среде.

Магнитные порошки подразделяются на виды в зависимости от их назначения и технологии изготовления. Наибольшее распространение нашли черный порошок измельченной окись-закиси железа (Fe_3O_4) и буровато-красный порошок гамма-окиси железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), обладающий большим цветовым контрастом на поверхности объекта контроля.

Для повышения цветового контраста в магнитный порошок добавляют или люминофор (контроль в этом случае производится при ультрафиолетовом излучении) или светлую алюминиевую пудру (при контроле объектов с темной поверхностью).

Магнитные ленты. Магнитные ленты применяют в магнитографической дефектоскопии. Ленты бывают одно- и многослойными. Чаще применяют двухслойные ленты, состоящие из несущей немагнитной основы (лавсан, ацетилцеллюлоза и др.) и магнитоактивного слоя в виде порошков окиси железа, взвешенного в лаке, обеспечивающего хорошую адгезию с основой.

Магнитные ленты выпускают шириной 50 и 75 мм и применяют при контроле стыковых сварных соединений. Воспроизведение записанных на ленте магнитных полей рассеяния осуществляют с помощью магнитографических дефектоскопов. С помощью блока считывания дефектоскопа, состоящего из двух магнитных головок (типа магнитофонных), записанная на ленте информация преобразуется в электрические сигналы, которые поступают в электронный блок для усиления и селекции. Визуализация записи производится с помощью электронно-лучевой трубки, на экране которой получается видимое (телевизионное) изображение дефекта.

7.4. Магнитная дефектоскопия, магнитопорошковый метод

Магнитная дефектоскопия — это частный случай магнитного неразрушающего контроля, предусматривающий способ обнаружения дефектов в виде нарушения сплошности в объектах из ферромагнитных материалов. Сущность способа — регистрация магнитных полей рассеяния вблизи этих дефектов.

При помещении в однородное магнитное поле объекта контроля, не имеющего дефектов и резкого изменения формы, магнитный по-

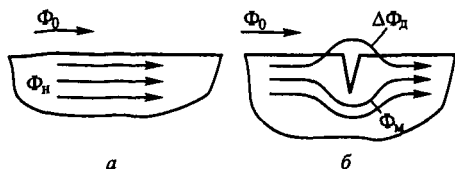


Рис. 7.4. Принцип магнитной дефектоскопии

ток Φ_m будет проходить по пути наименьшего сопротивления через материал, практически не выходя за пределы объекта (рис. 7.4, а).

Некоторая незначительная часть магнитного потока Φ_0 может проходить по воздуху. Это связано с тем, что магнитное сопротивление материала (металла) много меньше (в μ раз) сопротивления воздуха, поскольку оно обратно пропорционально магнитной проницаемости.

При наличии трещины, перпендикулярной направлению магнитного потока, возникает препятствие в виде воздушного промежутка, резко увеличивающего магнитное сопротивление на этом участке. Поэтому поток Φ_m будет в основном огибать трещину снизу. Вместе с тем часть потока будет замыкаться в воздух над трещиной, т.е. появляется поток рассеяния над дефектом $\Delta\Phi_d$ (рис. 7.4, б).

В материале с очень большой магнитной проницаемостью и малым магнитным сопротивлением весь магнитный поток пойдет под трещиной и потока $\Delta\Phi_d$ практически не будет. Это означает весьма низкую чувствительность магнитной дефектоскопии при контроле таких материалов.

Величина μ зависит не только от вида ферромагнетика, но и от напряженности намагничивающего поля (см. рис. 7.1). Поэтому правильный выбор оптимальных режимов намагничивания усиливает поток рассеяния $\Delta\Phi_d$ над дефектом и повышает чувствительность метода.

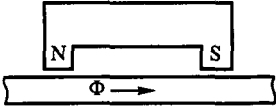
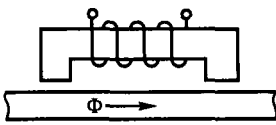
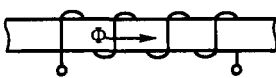
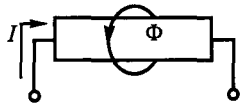
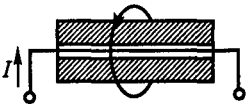
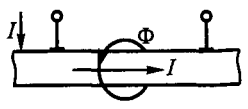
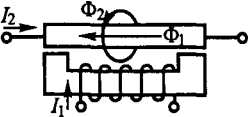
Дефекты оптимально обнаруживаются в случае, когда направление намагничивания контролируемой детали перпендикулярно направлению дефекта. Для создания оптимальных условий контроля применяют три вида намагничивания:

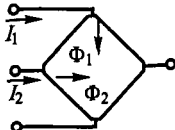
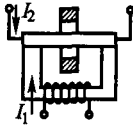
- циркулярное;
- продольное (полюсное);
- комбинированное.

Циркулярное намагничивание предназначено для деталей, имеющих форму тел вращения (при этом что-то вращается: деталь или магнитный поток). Продольное (полюсное) намагничивание осуществляется с помощью электромагнитов, постоянных магнитов или соленоидов. При этом деталь намагничивается обычно вдоль своего наибольшего размера. На ее краях образуются полюсы, создающие поле обратного направления. Комбинированное намагничивание осуществляется при одновременном намагничивании детали двумя или несколькими изменяющимися магнитными полями.

Виды, способы и схемы намагничивания деталей при магнитном неразрушающем контроле приведены в табл. 7.1 [2].

Таблица 7.1

Вид намагничивания (по форме магнитного потока)	Способ намагничивания	Схема намагничивания
Продольное (полюсное)	Постоянным магнитом	
	Электромагнитом	
	Соленоидом	
Циркулярное	Пропусканием тока по детали	
	С помощью провода с током, помещаемого в отверстие детали (вращающейся)	
	С помощью контактов, устанавливаемых на деталь (вращающуюся)	
	Путем индуктирования тока в детали	
Комбинированное	Пропусканием тока по детали и с помощью электромагнита	

Вид намагничивания (по форме магнитного потока)	Способ намагничивания	Схема намагничивания
Комбинированное	Пропусканием двух (или более) сдвинутых по фазе токов по детали во взаимно перпендикулярных направлениях	
	Путем индуцирования тока в детали и током, проходящим по проводнику, помещаемому в отверстие детали	

Различают магнитомягкие и магнито жесткие материалы. Магнитомягкие размагничиваются при убиении поля (стали Ст3, Ст10). Магнито жесткие остаются намагниченными при удалении поля (закаленная сталь).

Намагниченные детали из магнито жестких материалов после проведения контроля должны быть размагничены во избежание налипания на них металлических стружек и опилок, которые в последующем могут попасть в подшипники, направляющие, зубчатые передачи и другие узлы и вывести их из строя. Качество размагничивания можно проверить с помощью магнитометра, магнитной стрелки или с помощью бритвенного лезвия, подвешенного на нитке.

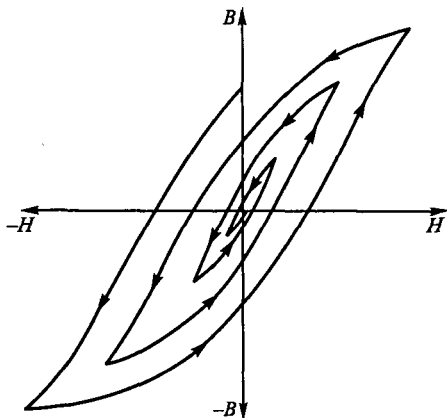
Существует три способа размагничивания:

- статический;
- динамический;
- термический.

Статическое размагничивание осуществляется при помощи внешнего магнитного поля, которое приводит намагниченность магнитного материала к такому значению, что при удалении поля она становится равной нулю. Для динамического размагничивания деталь помещают в переменное магнитное поле с амплитудой, равномерно уменьшающейся от некоторого максимального значения до нуля. При этом происходит постепенное перемагничивание в соответствии со схемой, приведенной на рис. 7.5. В ряде случаев может быть использован более эффективный способ размагничивания — нагрев изделия до температуры точки Кюри, при которой магнитные свойства материала пропадают. Этот способ имеет весьма ограниченное применение, так как при нагреве могут изменяться механические свойства материала.

Магнитные дефектоскопы состоят из следующих основных узлов: источника тока, устройства для подвода тока к детали и ее по-

Рис. 7.5. Схема динамического размагничивания



люсного намагничивания, магнитного преобразователя для индикации магнитного поля, осветительного устройства, измерителя тока или напряженности магнитного поля.

В зависимости от назначения в дефектоскопах могут быть не все из перечисленных узлов, но могут быть и дополнительные узлы (например, узлы для автоматического перемещения детали и механической разбраковки, дефектоотметчики и т.п.).

Для регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов наибольшее применение нашли магнитные порошки, обеспечивающие наивысшую чувствительность. При магнитопорошковой дефектоскопии контроль включает следующие основные этапы:

- подготовка поверхности деталей;
- намагничивание деталей;
- обработка сухим порошком или суспензией;
- осмотр деталей, оценка имеющихся дефектов и, при необходимости, размагничивание.

Магнитопорошковым методом определяют поверхностные дефекты и дефекты, располагающиеся на небольшой глубине. Чувствительность контроля определяется многими факторами: магнитными характеристиками материала, свойствами применяемого порошка и т.п. Увеличение шероховатости приводит к снижению чувствительности, поскольку магнитный порошок оседает на неровностях поверхности, т. е. поверхность нужно готовить: очистить от окалины, грязи, смазки. Наклеп поверхности часто принимают за дефект. Контроль сварных швов возможен только после их механической зашлифовки. Допускается проведение контроля по немагнитным покрытиям. Наличие таких покрытий при толщине до 20 мкм практически не влияет на чувствительность метода.

Чувствительность магнитопорошкового метода дефектоскопии определяется на контрольных образцах с естественными или искусственными дефектами. Конструктивно образцы с поверхностными

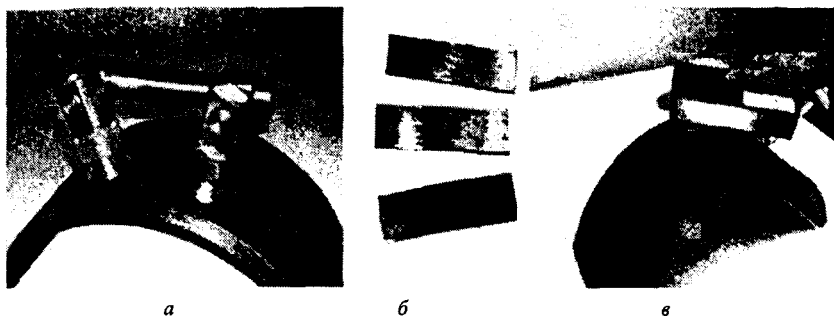


Рис. 7.6. Комплект оборудования для магнитолюминесцентной дефектоскопии:
а — намагничивающее устройство «МАГУС-М»; *б* — комплект стандартных образцов;
в — ультрафиолетовый осветитель «УФО-9-ЭВ»

искусственными дефектами аналогичны соответствующим образцам, используемым в капиллярном контроле (см. 4.4).

Для магнитопорошкового контроля в основном применяют дефектоскопы трех видов:

- стационарные универсальные;
- передвижные и переносные универсальные;
- специализированные (стационарные, передвижные, переносные).

Для решения задач технической диагностики нефтегазового оборудования применяют в основном переносные магнитопорошковые дефектоскопы. Например, переносный магнитопорошковый дефектоскоп ПМД-70, выпускаемый отечественной промышленностью [17, т. 4 с. 419]. В полевых условиях эффективным средством для контроля локальных участков зарекомендовали себя портативные устройства для полюсного намагничивания в виде электромагнитного ярма (различной мощности) и намагничивающие устройства на постоянных магнитах. Так, на рис. 7.6 приведен выпускаемый предприятием «Энерговест» (г. Екатеринбург) комплект оборудования для магнитолюминесцентной дефектоскопии на базе намагничивающего устройства «МАГУС-М», состоящего из двух постоянных магнитов. Магниты изготовлены из сплава редкоземельных элементов и соединены друг с другом жестким магнитопроводом. Отличительной особенностью устройства «МАГУС-М» является наличие механизма отключения магнитного потока.

Помимо намагничивающего устройства комплект включает стандартные образцы для контроля чувствительности и портативный ультрафиолетовый облучатель «УФО-9-ЭВ». В качестве расходных материалов применяют соответствующие магнитные порошки, поставляемые обычно в аэрозольных упаковках. Особенностью данного комплекта является возможность его применения во взрывопожароопасных помещениях, где использование сетевого электрооборудования запрещено правилами безопасности.

7.5. Дефектоскопия стальных канатов

Подъемные устройства различных типов применяют на большинстве объектов нефтегазовой промышленности в качестве основного и вспомогательного оборудования. Основным видом гибких грузовых элементов подъемных устройств являются стальные канаты. Магнитный неразрушающий контроль в последние годы все более широко начинает применяться для дефектоскопии таких канатов, изготовленных из ферромагнитных материалов. Та же аппаратура может быть использована и для контроля длинных стержневых деталей, например таких, как штанги глубинных насосов.

Принцип магнитной дефектоскопии основан на оценке магнитного потока вдоль участка каната и регистрации изменений в его распределении. Эти изменения могут быть обусловлены рядом причин: изменением площади поперечного сечения каната, наличием обрывов проволок, изменением магнитных свойств материала проволок, например из-за локального термического воздействия, приводящего к изменению структуры металла.

Дефектоскопию стальных канатов осуществляют с использованием переменного или постоянного магнитного поля (РД 03-348—00 «Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов»). При использовании переменного магнитного поля магнитный поток вдоль продольной оси участка контролируемого каната создают посредством возбуждающей индуктивной катушки с переменным током, охватывающей канат. Измерительная катушка также охватывает канат, и в ней индуцируется ЭДС, зависящая от площади поперечного сечения каната по металлу. Метод переменного магнитного поля используют, как правило, только для измерения потери сечения каната.

Метод постоянного магнитного поля используют как для измерения потери сечения каната, так и для обнаружения локальных дефектов. Постоянный магнитный поток вдоль продольной оси участка контролируемого каната создают постоянными магнитами или электромагнитами постоянного тока. Общий магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами или электромагнитом (часть этого потока), измеряют датчиками Холла либо другими датчиками, пригодными для измерения абсолютного значения магнитного потока или изменений этого потока. Сигнал датчиков зависит от магнитного потока, проходящего через участок контролируемого каната и, следовательно, от поперечного сечения этого участка по металлу.

Локальные дефекты каната, например обрывы проволок, создают вблизи дефектов магнитные потоки рассеяния, которые регистрируются датчиками Холла, катушками или другими магниточувствительными элементами. Сигналы датчиков зависят не только от размеров локальных дефектов, но и от их типа и положения, поэтому определить количественно параметры дефектов обычно затруднительно. Качественный анализ полученной информации о локальных

дефектах выполняют по дефектограммам на основании накопленного опыта.

В различных странах мира в настоящее время выпускается около 15 моделей канатных дефектоскопов. В России выпускаются две модели: УДК-3 (изготавливается в Екатеринбурге) и «Интрос» (изготавливается в Москве). По мнению автора, наиболее совершенной моделью из всех известных в мировой практике является российский дефектоскоп «Интрос».

Дефектоскоп «Интрос» состоит из электронного блока (ЭБ) и магнитной головки (МГ) со сменным блоком датчиков (БД). К ЭБ может быть подключена любая МГ для контроля соответственно круглых и плоских стальных, а также резинотросовых канатов. Одновременно к ЭБ может быть подключена только одна МГ. Принципиальная схема магнитной головки для круглых канатов с блоком датчиков представлена на рис. 7.7.

Магнитная система МГ намагничивает участок контролируемого каната. Магнитные поля рассеяния, вызванные дефектами каната, создают на выходе блока датчиков электрический сигнал, который после усиления и преобразования в цифровую форму обрабатывается в микропроцессоре. В микропроцессор поступают также импульсы со счетчика метража. Получаемая информация запоминается и выводится на световой индикатор ЭБ, а также может быть передана на внешний компьютер для хранения, обработки и последующего анализа.

Конструктивно МГ выполнена в виде постоянного разъемного магнита вместе со съемными БД. МГ рассчитана таким образом, что контролируемый канат предварительно промагничивается до насыщения (точка B_s , на рис. 7.2). При износе каната и уменьшении его диаметра параметры петли гистерезиса и величина B_s также уменьшаются. Изменение величины индукции B измеряется датчиками Холла, установленными в БД. Магнитный поток, проходящий через канат, при уменьшении сечения каната уменьшается, а по воздуху — увеличивается, так как напряженность поля постоянных магнитов МГ остается неизменной. Датчики Холла измеряют магнитный поток Φ_0 , а также тангенциальную составляющую потока рас-

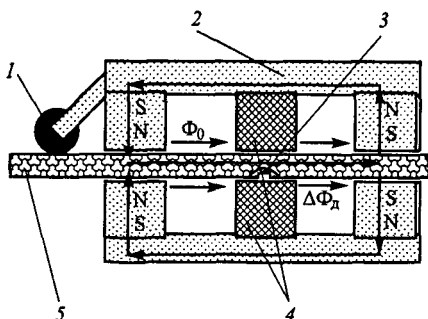


Рис. 7.7. Схема магнитной головки дефектоскопа «Интрос» для круглых канатов:

1 — счетчик метража; 2 — магнитная головка; 3 — локальный дефект; 4 — блоки датчиков; 5 — канат

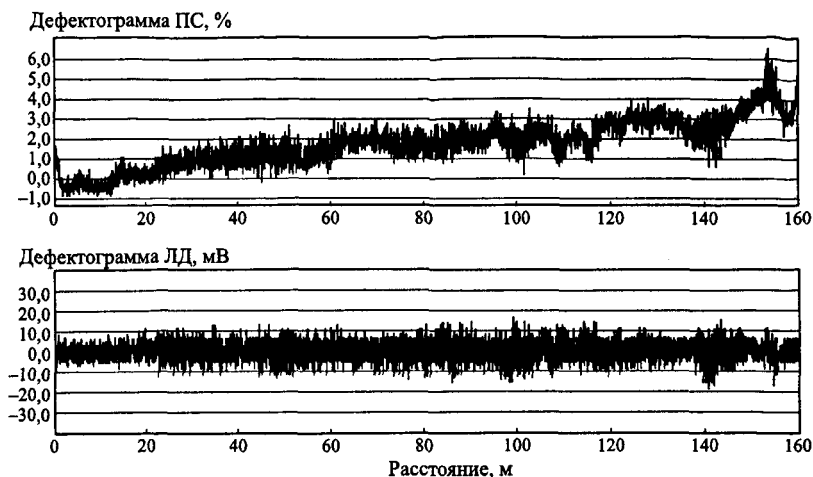


Рис. 7.8. Примеры дефектограмм по каналам ПС и ЛД

сеяния $\Delta\Phi_d$ над локальным дефектом в канате. Получаемая с блока датчиков информация записывается по двум каналам: каналу потери сечения (ПС) и каналу локальных дефектов (ЛД). Обработка на компьютере и анализ полученных дефектограмм позволяют оценить как общую потерю сечения каната, так и наличие локальных дефектов (обрывов проволоки) как на поверхности, так и внутри каната. Примеры дефектограмм приведены на рис 7.8.

Наиболее сложной задачей в области дефектоскопии стальных канатов является контроль их состояния в местах заделки в муфты (рис. 7.9), где часто возникает интенсивная коррозия проволок. Основных причин этого явления несколько. Во-первых, перед заливкой муфт легкоплавким сплавом (цинк, баббит и др.) концевой участок каната подвергается травлению кислотой и нанесению флюса на его основе. Во-вторых, часть каната, выходящая из муфты, дли-

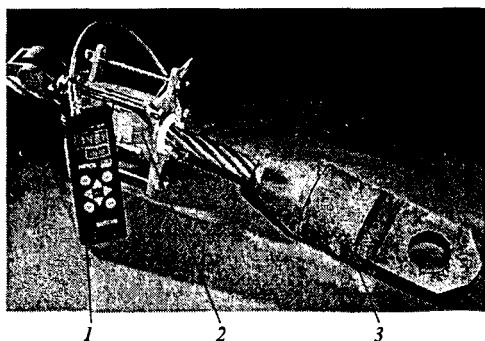


Рис. 7.9. Контроль каната в месте заделки в муфту дефектоскопом «Интрос»:

- 1 — электронный блок (ЭБ),
- 2 — магнитная головка (МГ),
- 3 — муфта

ной 5...10 см обвязывается мягкой проволокой, задерживающей пыль и влагу. Основной проблемой контроля каната в зонах заделки является влияние массивной муфты и сопутствующих элементов (натяжных болтов и др.) на величину магнитного потока, измеряемого прибором. Эту проблему удалось решить с использованием специальной методики обработки дефектограмм, разработанной ООО «Интрон Плюс» с участием инженерного центра АГТУ [20].

7.6. Метод магнитной памяти

Методом намагниченности по ГОСТ 18353-79 (см. табл. 1.2) называют метод, основанный на регистрации намагниченности контролируемого объекта. В технической литературе данный метод часто называют магнитометрическим, так как при этом измеряются параметры магнитного поля объекта и осуществляется их последующий анализ. Наиболее широко данный метод применяется при поиске трасс подземных трубопроводов, для выявления магнитных аномалий трубопроводов и их бесконтактной диагностики, а также при выполнении экспресс-диагностики локальных участков некоторых видов технологического оборудования. Технология магнитометрического контроля трубопроводов подробно изложена, например в разработанном НТЦ «Транскор-К» РД 102-008-2002 «Инструкция по диагностике технического состояния трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом».

Для экспресс-диагностики локальных участков оборудования наибольшее распространение нашел так называемый *метод магнитной памяти* металла (ММП). На самом деле магнитной памятью металлов называется физический эффект, связанный с восстановлением предварительно деформированного образца, а метод ММП к данному эффекту никакого отношения не имеет.

Методом магнитной памяти металла называют метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации распределения остаточной намагниченности металла в зоне дефекта (зоне высокого магнитного сопротивления), возникающей под действием технологических и эксплуатационных факторов. В ряде литературных источников этот метод называется *магнитометрическим*. Метод позволяет по характеру распределения поля остаточной намагниченности на поверхности изделия выявить потенциально опасные участки конструкции на стадии предразрушения и разрушения в виде линий и зон концентрации напряжений, деформаций и поверхностных трещин. Впервые этот метод открыл и использовал на Волгоградской ГЭС В.М. Филимонов [12]. Он обнаружил, что нержавеющие трубы выходят из строя намагниченными. В зоне концентрации напряжений возникают поля рассеяния, которые можно обнаружить с помощью

магнитометра. В дальнейшем метод получил широкое распространение благодаря работам А.А. Дубова [6].

Намагничивание ферромагнетиков может происходить не только под действием специально созданного внешнего намагничивающего поля или сформироваться под действием технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов, но и произойти в естественных условиях под действием магнитного поля Земли. Это поле имеет весьма малую напряженность, поэтому намагничивание происходит в течение длительного периода времени, при этом изделие должно быть неподвижным относительно направленности поля. Изделия, перемещающиеся в пространстве в разных направлениях, естественным магнитным полем Земли не намагничиваются.

Наиболее сильно этот эффект проявляется в протяженных трубопроводах, которые намагничиваются до такой степени, что при сварке трубопроводов возникает значительное отклонение электрической дуги («магнитное дутье»), что существенно затрудняет процесс сварки.

Магнитная память металла проявляется в необратимом изменении его намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок в процессе эксплуатации изделия. Установлено, что в зонах концентрации напряжений изделий, намагнитившихся в естественном магнитном поле Земли, где под действием эксплуатационных нагрузок происходит интенсивное перемещение дислокаций, зарождение и развитие микротрещин, предшествующих разрушению, магнитное сопротивление растет, а характер поля остаточной намагниченности резко изменяется. Нормальная составляющая H_p напряженности поля остаточной намагниченности скачкообразно меняет знак, при этом в центре зоны (на линии) концентрации напряжений (КН) $H_p = 0$, а касательная составляющая H_t напряженности максимальна. Аналогичный эффект имеет место и при наличии поверхностных деформаций и трещин.

Распределение магнитного потока в зоне КН (зоне высокого магнитного сопротивления) аналогично приведенному на рис. 7.4, а характер изменения нормальной и касательной составляющих показан на рис. 7.10. Вдоль линии КН нередко происходит повышение твердости металла. Металлографические исследования в этом случае выявляют повреждения структуры металла в той или иной степени.

Значение нормальной составляющей $H_p = 0$, и ее скачкообразное изменение более точно определяет положение зоны КН, и в действующей нормативной документации с применением ММП принимается основным диагностическим признаком.

Природа изменения характера поля H_p в зонах КН на сегодняшний день изучена недостаточно. Предполагается, что при перемещении дислокаций и возникновении пластических деформаций за счет магнитоупругого и магнитомеханического эффектов в зонах КН одновременно происходит и разворот доменов, что приводит к изменению поля остаточной намагниченности. В местах наибольшей концентрации дефектов и неоднородностей структуры образуются узлы закрепления доменных стенок с выходом на поверхность в виде ли-

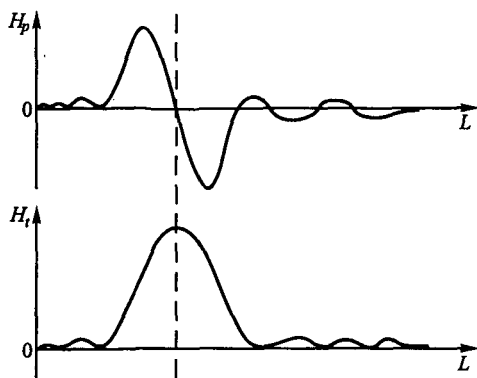


Рис. 7.10. Характер распределения составляющих поля остаточной намагниченности в зоне концентрации напряжений

ний смены знака поля H_p [6]. При этом линия $H_p = 0$ соответствует сечению детали с максимальным магнитным сопротивлением. Такое распределение поля остаточной намагниченности в нагруженных конструкциях формируется только в малом внешнем поле, каким является магнитное поле Земли, когда энергия деформации намного превосходит энергию внешнего магнитного поля.

Характер распределения поля H_p можно оценить или с помощью универсальных магнитометров, или с помощью специализированных магнитометров-индикаторов напряжений типа ИКН-1М, выпускаемых НПО «Энергодиагностика» (г. Реутов Московской обл.). Дополнительно для количественной оценки уровня концентрации определяется градиент (интенсивность изменения) $K_{ин}$ нормальной составляющей остаточного магнитного поля при переходе через линию концентрации напряжений $H_p = 0$:

$$K_{ин} = \frac{|\Delta H_p|}{2l_k},$$

где $|\Delta H_p|$ — модуль разности поля H_p между двумя точками контроля, расположенными на равных отрезках l_k по обе стороны от линии $H_p = 0$.

При этом отрезки l_k расположены перпендикулярно линии $H_p = 0$, что обусловлено их совпадением с направлением главных (максимальных) растягивающих или сжимающих напряжений. По величине градиента напряженности магнитного поля можно судить о степени опасности возникших в объекте дефектов или концентрации напряжений.

Определяют максимальное $K_{ин}^{max}$ и среднее $K_{ин}^{cp}$ значения для всех зон КН, выявленных при контроле объекта. Далее выявляют зоны КН с самыми большими значениями $K_{ин}^{max}$ и вычисляют отношение m :

$$m = K_{ин}^{max} / K_{ин}^{cp}.$$

Если m превышает $m_{пр}$, то делается вывод о предельном состоянии металла, предшествующем повреждению объекта контроля. Величина $m_{пр}$ характеризует деформационную способность металла на стадии упрочнения перед разрушением и определяется по специальной методике.

Наиболее опасными элементами современных промышленных и магистральных трубопроводов и нефтехранилищ являются их сварные соединения. Наряду с остаточными термическими напряжениями после сварки в швах могут образоваться различные технологические дефекты (непровары, подрезы, газовые поры, шлаковые включения и др.), создающие условия для возникновения концентрации напряжений. В дополнение к сложным статическим и циклическим эксплуатационным нагрузкам (под действием собственного веса и технологической среды, тепловых расширений, циклического рабочего давления и температуры, неравномерности распределения температуры и воздействия коррозии и т.д.) могут действовать неучтенные нагрузки, например из-за нарушения расчетного состояния опорно-подвесной системы, заземления отдельных участков конструкции, просадки фундамента и т. п. В результате прежде всего в сварных соединениях возникают повреждения, которые развиваются по механизму усталости, ползучести, коррозии, дисперсионного охрупчивания при повторном нагреве, водородного охрупчивания.

По трудоемкости ММП-контроль относится к экспресс-методам, что позволяет резко увеличить объем проконтролированных участков трубопроводов и нефтехранилищ и прежде всего их сварных соединений.

Основная задача ММП-контроля — определение на объекте контроля наиболее опасных участков и узлов, характеризующихся зонами КН. Затем с помощью других методов неразрушающего контроля (например, ультразвукового или рентгеновского) в зонах КН определяется наличие конкретного дефекта.

Основные преимущества нового метода неразрушающего контроля по сравнению с известными методами следующие:

- не требует применения специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания металла сосудов и трубопроводов под действием рабочих нагрузок в магнитном поле Земли;
 - места концентрации напряжений заранее не известны и определяются в процессе контроля;
 - не требует зачистки металла и другой какой-либо подготовки контролируемой поверхности;
 - для выполнения контроля используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства.
- Факторами, ограничивающими применение метода ММП, являются:

- искусственная намагниченность металла;
- постороннее ферромагнитное изделие на объекте контроля;

- наличие вблизи (ближе 1 м) объекта контроля источника внешнего магнитного поля;
- перемещение объекта контроля в пространстве относительно направления магнитного поля Земли.

7.7. Магнитная структуроскопия

Все изменения в структуре материала в процессе его изготовления, обработки, зарождения и развития повреждений отражаются в соответствующих изменениях магнитных и электрофизических параметров. Появление этих изменений объясняется разворотом и перемещением доменов и междоменных границ, составляющих в совокупности доменную структуру материала. В основу методов магнитной структуроскопии положена корреляция между некоторыми магнитными и физико-механическими свойствами материалов, когда они одновременно зависят от одних и тех же факторов: химического состава, режима термообработки, напряженного состояния, накопления усталостных повреждений и др. По использованным магнитным информативным параметрам различают следующие разновидности магнитной структуроскопии:

- ферритометрия;
- коэрцитиметрия;
- контроль по остаточной намагниченности;
- контроль по магнитной проницаемости;
- контроль по магнитным шумам.

Наибольшее распространение нашли две первые разновидности магнитной структуроскопии.

Ферритометрия применяется для контроля ферритной фазы, повышенное содержание которой снижает трещиностойкость сталей и особенно сварных соединений. Содержание этой фазы определяет магнитную проницаемость материала, поэтому для ее определения измеряют магнитное сопротивление. Измерительным элементом ферритометра является одно- или двухполюсный феррозондовый магнитный преобразователь, содержащий возбуждающую и измерительную катушки. Магнитный поток, создаваемый возбуждающей катушкой феррозонда, зависит от магнитного сопротивления участка объекта контроля, определяемого содержанием ферритной фазы. Поэтому ее величину оценивают по ЭДС, наведенной при этом в измерительной катушке. Градуировка ферритометров производится по эталонным образцам с известным содержанием ферритной фазы. Большую погрешность при измерении может внести изменение зазора между преобразователем и поверхностью объекта контроля, а также геометрия этой поверхности (край, кривизна).

Наиболее широко в структуроскопии используется зависимость между твердостью углеродистых и низколегированных сталей и их

коэрцитивной силой. Твердость в свою очередь определяется температурой закалки и отпуска, что позволяет использовать коэрцитивную силу для контроля режимов термообработки стали.

В последние годы коэрцитиметрия стала широко применяться для контроля напряженного состояния металлоконструкций опасных производственных объектов различного назначения, что является весьма актуальным для технической диагностики. Так, ЗАО «ИКЦ КРАН» (г. Москва) совместно с научно-производственной фирмой «Специальные научные разработки» (г. Харьков, Украина) под руководством Б.Е. Попова разработали методику, создали аппаратуру и подготовили согласованный с Госгортехнадзором РФ нормативный документ: РД ИКЦ «КРАН» 009-99 «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением, при проведении экспертизы промышленной безопасности». Данная методика позволяет по величине коэрцитивной силы H_c определить действующие напряжения в упруго-пластической области, степень деформации и остаточный ресурс металлоконструкций при циклическом нагружении. Установлено, что микро- и макродефекты структуры углеродистых и малолегированных сталей, накапливаясь в процессе циклического нагружения, как бы собирают и хранят информацию, однозначно связанную с максимальными величинами действовавших нагрузок, в результате чего структура доменов выполняет функции магнитной памяти повреждения металла. Согласно теории Е.И. Кондорского, изменения внутренних напряжений $\Delta\sigma_{\text{вн}}$ и связанная с ними деформация материала λ_s вызывают смещение доменных границ и необратимое намагничивание, характеризуемое пропорциональными изменениями коэрцитивной силы ΔH_c :

$$\Delta H_c = \frac{\lambda_s}{\mu_s M_s} \Delta\sigma_{\text{вн}} \frac{\delta}{L},$$

где λ_s — изменение линейных размеров — магнитострикция; μ_s — абсолютная магнитная проницаемость; M_s — намагниченность; $\Delta\sigma_{\text{вн}}$ — средние значения амплитуды внутренних напряжений; δ — толщина границы доменов; L — длина волны напряжения в металле.

Коэрцитивная сила H_c , представляющая собой напряженность магнитного поля, необходимая для уменьшения намагниченности до нуля, является более информативным параметром, так как связана с магнитной энергией и внутренним полем анизотропии, различным для каждого типа стали. Величина H_c наряду с начальным и приложенным напряжениями определяется тонкой структурой металла и зависит от химического и фазового состава, размера зерна, плотности дислокаций, внутренних напряжений и дислокаций.

При наличии корреляционной зависимости между H_c и остаточной пластической деформацией $E_{\text{пл}}$ по величине коэрцитивной силы

можно вести контроль накопления упруго-пластических деформаций и повреждений в металле, а также усталостной прочности конструкций. Практически все виды традиционных низкоуглеродистых и малолегированных сталей, применяемые для изготовления объектов котлонадзора, а в равной степени и для объектов нефтегазовой промышленности, относятся к классу разупрочняемых, у которых значение H_c в состоянии поставки невысокое (2...6 А/см), а при эксплуатации текущая величина H_c возрастает до разрушения в 2–3 раза. Для таких сталей, как правило, существует устойчивая связь магнитных и механических свойств с коэффициентом корреляции не ниже 0,9. Для сталей типа Ст3, Ст20, 09ГС2 и им подобных она может быть представлена линейной зависимостью вида

$$H_c = H_c^0 + AE,$$

где H_c^0 — величина коэрцитивной силы в состоянии поставки; A — коэффициент, характерный для каждой марки стали; E — деформация.

Аналогичный вид имеет и зависимость $H_c(\sigma)$. По результатам статических испытаний образцов при растяжении и статистического анализа оформляются номограммы для контроля напряжений по величине коэрцитивной силы (рис. 7.11).

Номограммы в виде линейных зависимостей $H_c(\sigma)$ позволяют оперативно вычислить максимальные действующие напряжения с погрешностью около 5 % и выявить места с наибольшей концентрацией напряжений в элементах металлоконструкций.

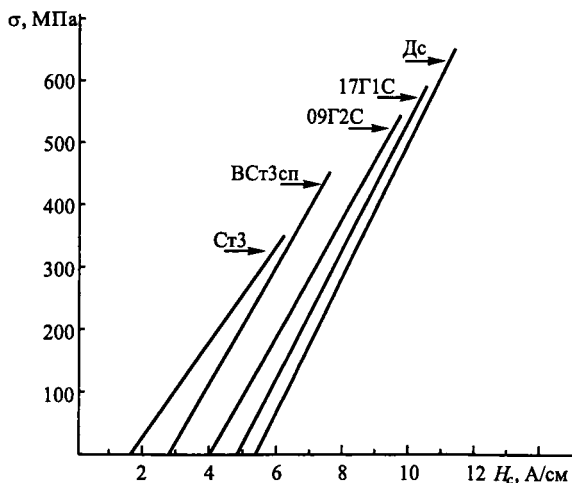
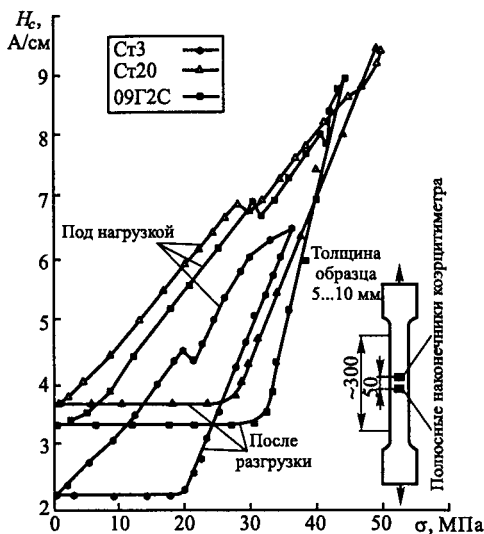


Рис. 7.11. Номограммы для контроля по коэрцитивной силе напряжений при одноосном растяжении плоских образцов из конструкционных сталей

Рис. 7.12. Измерение коэрцитивной силы на плоских образцах из сталей Ст3, Ст20 и 09Г2С при испытании на растяжение непосредственно под нагрузкой и после разгрузки на каждой ступени нагружения



Для всех типов конструкционных сталей могут быть построены также свои экспериментальные зависимости между коэрцитивной силой и максимальными действующими напряжениями σ или деформациями E в процессе ступенчатого нагружения с последующей разгрузкой (рис. 7.12).

На примере сталей Ст3, Ст20, 09Г2С видно, что после разгрузки величина H_c остается постоянной, равной исходной H_c^0 , вплоть до достижения предела текучести металла σ_T . В области течения и разупрочнения металла начинается необратимая перестройка доменной структуры за счет разворота на 90 и 180° доменных границ. После перехода в упруго-пластическую область H_c линейно возрастает до значения H_c^B , соответствующего пределу прочности металла σ_B .

Под нагрузкой величина H_c растет сразу после начала нагружения до величины H_c^T , соответствующей пределу текучести металла σ_T . А после небольшой площадки или зуба текучести при повышении нагрузки в области необратимых деформаций рост H_c продолжается одновременно с формированием новой доменной структуры и активным накоплением повреждений в металле вплоть до значения H_c^B , при котором происходит разрушение металла. После образования и раскрытия магистральной трещины происходит частичное снятие напряжений в зоне развития трещин и снижение H_c . Максимальное значение H_c^B соответствует пределу прочности металла σ_B .

Таким образом, энергия, затрачиваемая на работу разрушения металла, и максимальное значение H_c^B как при измерении непосредственно под нагрузкой, так и после разгрузки на каждой ступе-

ни нагружения практически одинаковы. В случае если стальной образец до испытаний имел остаточные напряжения сжатия (например, после обкатки), то при растяжении H_c сначала снижается до H_c^0 , а затем растет по механизму, описанному выше. Аналогичный процесс может наблюдаться и в трубах, прошедших экспандирование при изготовлении. Структурные и магнитные превращения здесь связаны со снятием напряжения одного знака и формированием доменной структуры под действием напряжения обратного знака.

Энергетический подход правомерен и при анализе усталостного разрушения магнитным методом. Запас энергии, затрачиваемой на накопление повреждений и разрушение, примерно одинаков для данных марок сталей как при статическом, так и циклическом нагружениях, т. е. $H_c^B \sim H_c^{уст}$.

Величина H_c определяется векторной суммой действующих напряжений первого, второго и третьего родов. Поэтому при магнитном контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций необходимо учитывать не только абсолютные значения напряжений, но и их направление по отношению к расположению магнитных силовых линий в месте контроля.

Напряжения третьего рода определяются структурой и химическим составом металла. Напряжения второго рода являются начальными и формируются при изготовлении конструкции. Они увеличивают коэрцитивную силу и образуют в металле поля остаточных напряжений определенного знака. Напряжения первого рода обусловлены воздействием эксплуатационных нагрузок. Эти напряжения, накладываясь на предыдущие, могут как уменьшать, так и увеличивать H_c в области упругих деформаций в зависимости от направления действия последних. Однако при переходе в упруго-пластическую область напряжения первого рода оказывают преобладающее влияние, и под их действием коэрцитивная сила возрастает по закону, близкому к линейному, вплоть до H_c^B , соответствующей пределу прочности данного материала.

Для измерения коэрцитивной силы используют коэрцитиметры с приставным электромагнитом. Ранее в течение ряда лет отечественной промышленностью серийно выпускался коэрцитиметр КИФМ-1, включающий приставной электромагнит с феррозондовым преобразователем. С 1998 г. МНПО «Спектр» (г. Москва) совместно с научно-производственной фирмой «Специальные научные разработки» приступили к серийному выпуску цифрового полуавтоматического структуроскопа-коэрцитиметра КРМ-ЦК-2, в приставном П-образном электромагните которого использован в качестве магнитного преобразователя датчик Холла. Схема приставного электромагнита приведена на рис. 7.13.

Модель КРМ-ЦК-2 имеет автономное питание — портативный аккумулятор, выполненный заодно с измерительным блоком, поэтому его можно использовать при диагностировании различных объектов как в полевых, так и во взрывопожароопасных условиях. Прин-

цип действия прибора основан на вычислении коэрцитивной силы по измеряемому току компенсации остаточной магнитной индукции в замкнутой магнитной цепи, составленной из магнитопровода приставного электромагнита и контролируемого изделия. Цикл измерений включает этапы: намагничивание контролируемого изделия; компенсация остаточной намагниченности; вычисление коэрцитивной силы; индикация результатов измерения.

Намагничивание осуществляется путем пропускания импульсов постоянного тока по обмотке возбуждения приставного электромагнита (см. рис. 7.13). При этом участок изделия между полюсными наконечниками промагничивается до насыщения. После выключения тока в обмотке в магнитной цепи электромагнита за счет остаточной индукции контролируемого изделия существует остаточный магнитный поток, создающий сигнал на выходе датчика Холла. Далее осуществляется автоматическая компенсация остаточной намагниченности путем пропускания по обмотке тока противоположного направления. Ток компенсации увеличивается до тех пор, пока магнитный поток в цепи не станет равным нулю. Этому состоянию соответствует отсутствие выходного сигнала на датчике Холла, т. е. датчик Холла играет роль нуль-индикатора. Чем больше величина H_c , тем больше должен быть размагничивающийся ток компенсации. По величине тока компенсации магнитного поля вычисляется значение коэрцитивной силы, после чего происходит включение цифровой индикации величины коэрцитивной силы на табло передней стенки прибора. Для оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций контролируемого объекта при его диагностировании достаточно провести анализ распределения величины H_c по поверхности объекта, выявить наиболее нагруженные элементы ($H_c^{\max}$) и сравнить эти значения с H_c^T или H_c^B , соответствующими пределам текучести и прочности металла, из которого изготовлен объект. Если металл объекта работает в упругой или упруго-пластической области, то значения H_c пересчитывают по номограммам для данной марки стали в напряжения σ и сравнивают их с допустимыми ($\sigma_{\text{доп}}$), полученными при расчете на прочность.

В качестве примера на рис. 7.14 (прил. 3 РД ИКЦ «КРАН» 009-99) приведены результаты контроля сосудов-воздухосборников В-10, широко применяемых на различных промышленных объектах, в том числе и в нефтегазовой отрасли. Контролировалось два воздухосборника, изготовленных из стали СтЗсп и отработавших по 25 лет при

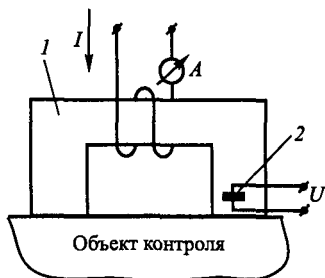


Рис. 7.13. Схема приставного П-образного электромагнита:

1 — электромагнит;
2 — датчик Холла

непосредственно сварных швов, являющихся, как правило, наиболее слабым звеном металлоконструкций технологического оборудования.

Разрушение металлоконструкций всегда происходит по наиболее нагруженной зоне с максимальным уровнем действующих напряжений. Наличие в такой зоне концентратора напряжений резко усугубляет ситуацию. В окрестности концентраторов напряжений многократно ускоряются процессы ползучести и усталости металла, поэтому их своевременное выявление имеет первостепенное значение. Условиями разрушения металлической конструкции, изготовленной из конструкционной стали, является величина максимальных напряжений в зоне концентратора (КМН) и высокий градиент разности главных механических напряжений (РГМН). Из сопротивления материалов известно, что для упруговязких конструкционных сталей наиболее точным является третий критерий прочности (критерий Треска), согласно которому необходимым условием трещины является

$$\tau = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right|_{\max} \geq [\tau],$$

где τ — касательные напряжения; $(\sigma_1 - \sigma_3)$ — разность главных механических напряжений; $[\tau]$ — допустимые касательные напряжения (принимаются равными пределу текучести металла).

Другими словами, для надежной оценки текущего технического состояния конструкции помимо КМН необходимо знание градиента РГМН.

Известно, что под действием механических напряжений и деформаций магнитные свойства материалов изменяются неравномерно. Структура металла в зоне концентраторов напряжений и направление вектора намагниченности отличаются от соседних зон. Это изменение можно выявить с помощью метода неразрушающего контроля, основанного на магнитомеханической анизотропии металла.

Наиболее общей характеристикой магнитных свойств металла при заданном напряженно-деформированном состоянии является предельная петля гистерезиса (см. рис. 7.2), параметры которой определяются индукцией B_s и напряженностью $H_{\max}$ магнитного поля насыщения, остаточной индукцией B_r и коэрцитивной силой H_c . Однозначно установить функциональную зависимость между каким-то отдельным параметром петли гистерезиса и напряженно-деформированным состоянием конструкции, изготовленной из ферромагнитного материала, как показывает теория магнитного контроля, не удастся. Связь между этими параметрами определяется корреляционными зависимостями с определенной достоверностью.

Исследованиями Института проблем технической диагностики и неразрушающих методов испытаний «ДИМЕНСтест» (г. Санкт-Петербург) установлено, что распределение различий в напряженном

состоянии на поверхности конструкции функционально связано с комплексом параметров соответствующих петель магнитного гистерезиса. Измерение ряда параметров петли гистерезиса резко повышает достоверность распознавания. Кроме того, одновременно измеряется угол поворота вектора магнитной индукции, определяемый зависимостью магнитной анизотропии металла от его напряженного состояния. Математическая обработка по соответствующему алгоритму результатов измерений перечисленных магнитных параметров позволяет установить фактическое распределение напряженного состояния на контролируемом участке конструкции, в том числе в сварных швах.

Измерение магнитных параметров осуществляют с помощью прибора магнитоанизотропного сканера-дефектоскопа «Комплекс 2.05». Обработка результатов измерений на компьютере по специальной программе позволяет получить картограммы разности главных механических напряжений, концентраторов механических напряжений и областей пластических деформаций (ОПД). Опасные участки контролируемой поверхности содержат изображение форм КМН и линий изостресс (линий, равных РГМН) с указанием численных значений и знака напряжений (растягивающие «+», сжимающие «—»), что позволяет непосредственно по картограмме оценить степень опасности выявленных дефектов и, при необходимости, определить наиболее эффективные методы ремонтно-восстановительных работ.

Дефектоскопом в общем случае называют прибор, предназначенный для обнаружения и измерения дефектов. В этом смысле прибор «Комплекс 2.05» не является дефектоскопом: по утверждению разработчиков, его следует отнести к новому классу средств технической диагностики. Не всякий дефект в виде разрыва сплошности или инородного включения создает местную КМН или высокий градиент РГМН. Если в зоне контроля этим прибором имеется дефект, не создающий возмущение поля напряжений и не являющийся концентратором напряжений, то данный дефект на картограммах РГМН и КМН не будет обозначен. Наличие таких дефектов не препятствует безопасной эксплуатации металлоконструкции. В то же время любой существенный концентратор напряжений в виде дефекта даже весьма малых размеров или дефекта, вообще не имеющего нарушения (разрыва) сплошности среды и не обнаруживаемого традиционными методами дефектоскопии, может быть выявлен на карте РГМН и КМН. К ним могут быть отнесены, например, такие опасные дефекты, как тонкие трещины, зарождающаяся межкристаллитная коррозия и др.

Прибор «Комплекс 2.05» предназначен прежде всего для контроля сварных соединений магистральных трубопроводов, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, сосудов под давлением и других объектов, имеющих развитую поверхность.

8. ВИХРЕТОКОВЫЙ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОВОЙ ВИДЫ КОНТРОЛЯ

8.1. Вихретоковый вид контроля

Вихретоковый вид неразрушающего контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимым в объекте контроля этими токами. Параметры наведенного поля определяются геометрическими и электромагнитными характеристиками контролируемого объекта. Результаты этого взаимодействия зависят от величины и характера как внешнего, так и наведенного полей. Для создания внешнего электромагнитного поля чаще всего используют индуктивные катушки, через которые пропускают переменный ток соответствующей частоты. Устройство, состоящее из одной или нескольких индуктивных катушек, предназначенное для возбуждения в объекте контроля вихревых токов и преобразования зависящего от параметров объекта электромагнитного поля в электрический сигнал, называется *вихретоковым преобразователем*.

Вихревые токи возникают в электропроводящих телах под воздействием изменения внешнего магнитного поля, которое может происходить как за счет изменения магнитного потока во времени, так и в результате относительного перемещения электропроводящего тела и магнитного потока. Впервые наиболее подробно вихревые токи исследованы французским физиком Ж. Фуко (1819—1868) и часто называются его именем (токи Фуко). Замыкаясь в электропроводящем теле, вихревые токи образуют электрические контуры, индуцирующие встречный магнитный поток, сцепляющийся с внешним магнитным полем. В результате взаимодействия этих встречных магнитных потоков происходит изменение ЭДС измерительной или полного электрического сопротивления возбуждающей индуктивных катушек преобразователя. Величины этих изменений, являющихся первичным информативным параметром, зависят от параметров объекта контроля, величины напряженности внешнего электромагнитного поля H_n и расстояния a до объекта контроля.

В настоящее время разработано большое количество различных конструкций преобразователей, которые принято классифицировать по следующим признакам:

- по типу преобразования параметров объекта контроля в выходной сигнал вихретокового преобразователя;
- по способу соединения катушек преобразователя;
- по расположению преобразователя относительно объекта контроля.

По первому признаку преобразователи разделяют на параметрические и трансформаторные. Параметрический преобразователь

имеет лишь одну индуктивную возбуждающую катушку, активное и реактивное сопротивление которой зависит от параметров объекта и условий его контроля. Трансформаторный вихретоковый преобразователь содержит не менее двух индуктивно связанных катушек (возбуждающих и измерительных) и преобразует контролируемый параметр в ЭДС измерительной катушки.

По второму признаку вихретоковые преобразователи делят на абсолютные и дифференциальные. Абсолютным называют вихретоковый преобразователь, сигнал которого определяется абсолютным значением параметра объекта контроля, дифференциальным — сигнал которого определяется приращением параметра объекта контроля.

В зависимости от расположения относительно объекта контроля преобразователи разделяют на проходные, накладные и комбинированные. В свою очередь проходные разделяют на наружные, внутренние, погружные и экранные. Более подробно конструкции вихретоковых преобразователей рассмотрены, например, в [2].

При диагностировании нефтегазового оборудования с применением вихретокового вида контроля обычно применяют накладные трансформаторные преобразователи карандашного типа. Схема контроля с использованием таких преобразователей приведена на рис. 8.1. Вихревые токи в объекте контроля возбуждаются с помощью индуктивной катушки. Напряженность магнитного поля, создаваемого индуктивной катушкой, составляет $H_{\text{и}}$, напряженность встречного магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, — $H_{\text{в}}$. Результаты взаимодействия этих полей регистрируют с помощью измерительной катушки.

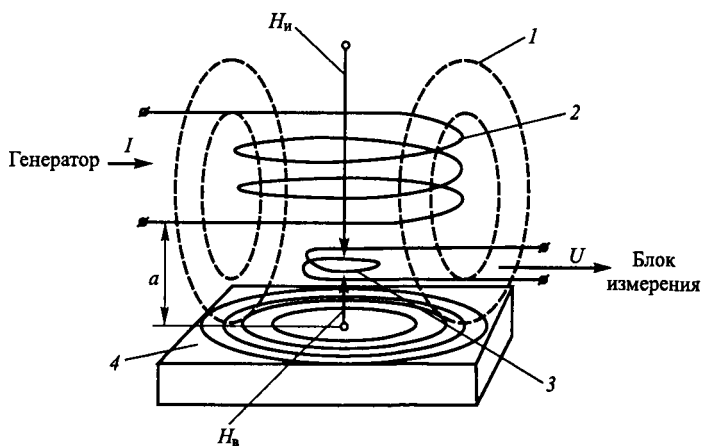
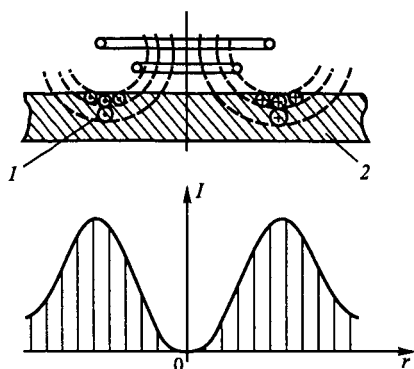


Рис. 8.1. Схема вихретокового контроля:

1 — силовые линии; 2 — индуктивная катушка; 3 — измерительная катушка; 4 — контролируемый объект

Рис. 8.2. Распределение плотности вихревых токов:

1 — вихревые токи; 2 — объект контроля



Плотность вихревых токов имеет неравномерное распределение в объекте контроля. Плотность максимальна на поверхности объекта в контуре, диаметр которого близок к диаметру контура возбуждающей катушки, и убывает до нуля на оси катушки при увеличении расстояния r . С увеличением глубины объекта контроля плотность вихревых токов также убывает. На рис. 8.2 приведены разрез объекта контроля по оси возбуждающей катушки и соответствующая эпюра распределения плотности вихревых токов в зависимости от удаления r от оси катушки.

Глубина проникновения вихревых токов в объект контроля зависит от конструкции вихретокового преобразователя, формы объекта контроля и интенсивности затухания на глубине. Для накладного вихретокового преобразователя глубина проникновения δ вихревых токов в объект контроля, в глубине которого плотность вихревых токов в 2,7183 раза (в e раз) меньше, чем на поверхности, может быть ориентировочно определена по формуле

$$\delta = \sqrt{2} \frac{r}{\beta},$$

где r — радиус эквивалентного витка обмотки преобразователя; β — обобщенный параметр вихретокового контроля, характеризующий свойства преобразователя и условия контроля:

$$\beta = R\sqrt{w\mu_0\mu\sigma},$$

где w — круговая частота тока возбуждения; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$ — магнитная постоянная; μ — магнитная проницаемость среды; σ — удельная электрическая проницаемость среды.

Глубина проникновения вихревых токов обуславливает соответственно и максимальную глубину залегания выявленных дефектов. Наиболее уверенно при вихретоковом контроле электропроводящих

материалов выявляются поверхностные трещины, где плотность вихревых токов максимальна, а также подповерхностные трещины и пустоты, глубина залегания которых обычно не превышает 3...4 мм.

Помимо обнаружения дефектов вихретоковый вид неразрушающего контроля широко применяют в целях структуроскопии для контроля физико-механических свойств объектов, связанных со структурой, химическим составом и внутренними напряжениями их материалов. Кроме того, вихретоковые приборы и установки используют для контроля размеров объекта, параметров его вибрации, обнаружения электропроводящих объектов (металлоискатели) и других целей.

Достоинствами вихретокового контроля являются сравнительная простота, высокая производительность и чувствительность. Для проверки чувствительности преобразователей и настройки аппаратуры контроля используют стандартные образцы с дефектами, разрабатываемые на каждый типоразмер контролируемых изделий и подвергаемые метрологической аттестации согласно ГОСТ 8.315—83. Важным достоинством вихретокового контроля является также то, что его можно проводить при отсутствии непосредственного контакта между преобразователем и объектом контроля. Наличие изоляционных и лакокрасочных покрытий, толщина которых не превышает предельную величину, а также загрязнение поверхности проведению контроля не препятствуют.

Вихретоковый метод эффективно используют для контроля металлоконструкций технологического оборудования в зонах концентрации напряжений, в первую очередь в околошовных зонах сварных швов, а также для контроля валов, штоков, гильз и других подобных деталей, имеющих концентраторы напряжений в виде шпоночных пазов, галтелей, проточек, резьб и др. Вместе с тем этот метод не применяют для контроля самих сварных швов с неудаленным усилением, поэтому при диагностировании сосудов и аппаратов нефтегазовой промышленности вихретоковый контроль целесообразно использовать в сочетании с ультразвуковым, радиационным или акустико-эмиссионным методами.

8.2. Электрический вид контроля

Электрический вид неразрушающего контроля (по ГОСТ 25315—82) основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в объекте контроля в результате внешнего воздействия. Перечень основных методов электрического вида контроля приведен в табл. 1.2.

В процессе технической диагностики нефтегазового оборудования методы электрического контроля используют в первую очередь для оценки целостности изоляционных покрытий. Преждевремен-

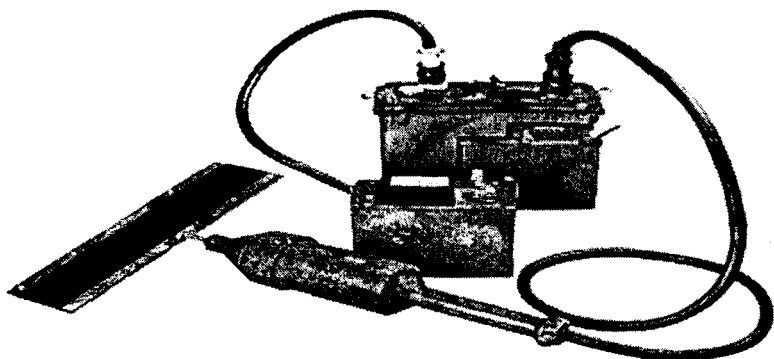


Рис. 8.3. Электроискровой дефектоскоп КРОНА-2И

ные коррозионные повреждения оборудования происходят главным образом из-за разрушения покрытий, наличия в них микроотверстий, утонений, пузырьков и других нарушений сплошности. Контроль состояния изоляции осуществляют обычно *электропараметрическим* (методом «влажной губки») и *электроискровым* («высоковольтным») методами.

Электроискровой метод основан на пробое воздушных промежутков между касающимися поверхности сухого изоляционного покрытия щупом или щеточным электродом, подключенным к одному полюсу источника высокого напряжения, и самим защищаемым объектом (например, подземным резервуаром), подключенным к другому полюсу источника высокого напряжения непосредственно или через грунт при помощи заземлителя. На основе этого метода разработан ряд моделей электроискровых дефектоскопов. Так, на рис. 8.3 приведен общий вид электроискрового дефектоскопа КРОНА-2И, серийно изготавливаемого АО «ИНТРОСКОП» и предназначенного для контроля эпоксидных, битумных, полимерных и эмалевых покрытий трубопроводов. Этот же прибор может быть использован для контроля защитных неэлектропроводящих покрытий других изделий любой конфигурации.

Для количественной оценки состояния изоляционных покрытий широко применяют также электропараметрический метод контроля, основанный на измерении электрических параметров объекта контроля. Для изоляционных покрытий важнейшим параметром является величина переходного сопротивления между покрытием и основным металлом. В частности, величина переходного сопротивления является по РД 12-411-01 одним из основных параметров, определяющих остаточный ресурс подземных стальных газопроводов (см. 12.6). Электрическая схема измерения переходного сопротивления изоляционного покрытия по РД 12-411-01 (методом «влажной губки») приведена на рис. 8.4.

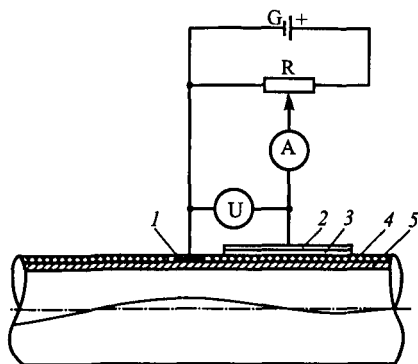


Рис. 8.4. Электрическая схема измерения переходного сопротивления изоляционного покрытия трубопровода

Перед проведением испытания на участке измерения переходного сопротивления с поверхности изоляционного покрытия газопровода тщательно удаляют загрязнения и влагу. В дистиллированной воде готовят 3 %-й раствор соды (Na_2CO_3) и смачивают им тканевое полотно 3, которое накладывают на изоляционное покрытие 4 по всему его периметру. Поверх устанавливают металлический электрод-бандаж 2, плотно облегающий тканевое полотно. Собирают электрическую схему согласно рис. 8.4. Отрицательный полюс источника питания G посредством механического контакта 1 присоединяют к зачищенному до металла участку трубы 5.

Резистором R отбирается от источника питания G рабочее напряжение в пределах 10...30 В, которое контролируется по вольтметру U . По амперметру A фиксируется сила тока.

Величину переходного сопротивления R , Ом·м², вычисляют по формуле

$$R = \frac{US}{I},$$

где U — рабочее напряжение, В; S — площадь металлического электрода-бандажа, м²; I — сила тока, А.

Измерения по схеме, показанной на рис. 8.4, проводят не менее трех раз при разных режимах. Величину переходного сопротивления вычисляют для каждого значения измеряемой силы тока. За фактическое сопротивление $R_{\text{ф}}$, учитываемое в расчете остаточного ресурса (см. 12.6), принимают среднюю арифметическую величину по результатам трех измерений.

Помимо отмеченных выше, методы электрического вида неразрушающего контроля применяют и в других случаях: например, при зондировании методом измерения сопротивления или электрической емкости грунта под днищем стальных вертикальных резервуаров с целью выявления наличия и определения местоположения диэлектрических аномалий. Аномалии с повышенной по сравнению с фоновыми значениями удельной проводимостью или диэлектриче-

ской проницаемостью относят к скоплению ржавчины или скоплению воды в месте нахождения хлопун. Аномалии с пониженной проводимостью или диэлектрической проницаемостью относят к скоплению нефти и нефтепродуктов в грунтовом основании резервуара.

Данный метод позволяет обнаружить зоны утечки нефтепродуктов через днище резервуара, повышенного коррозионного износа днища при высоком уровне грунтовых вод, а также идентифицировать вид дефекта: отпотина, утечка, повышенная коррозия и хлопун днища. Методика измерения сопротивления или электрической емкости грунта в основании резервуара приведена, например, в РД 153-112-017-97, применяемой АО «Акционерная компания трубопроводного транспорта нефтепродуктов «ТРАНСНЕФТЕПРОДУКТ».

При диагностировании бурового оборудования электропараметрический метод служит основным методом контроля коррозии обсадных труб. Степень коррозии при этом оценивается косвенным методом по величине продольного электрического сопротивления трубы, измеряемого с помощью контактного зонда, опускаемого в скважину. В практике диагностирования подземных трубопроводов применяется аппаратура бесшурфового нахождения повреждения изоляции (АНПИ), работа которой основана на регистрации характера изменения потенциалов вдоль трассы трубопровода. Методы электрического вида неразрушающего контроля в обязательном порядке используют при контроле электростатической безопасности резервуаров и трубопроводов, а также при контроле эффективности средств их электрохимической защиты путем измерения поляризационных потенциалов [19].

8.3. Тепловой вид контроля

Методы теплового вида контроля (по ГОСТ 23483-79) основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термометрическим чувствительным элементом (термопарой, фоторезистором, термоиндикаторами, пирокристаллом и т.п.) и преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистостей и др.) в параметры электрического или другого сигнала и передаче его на регистрирующий прибор. Температурное поле поверхности определяется особенностями процессов теплопередачи, зависящими в свою очередь от конструктивного исполнения контролируемого объекта и наличия внешних и внутренних дефектов. Основной характеристикой теплового поля, используемой в качестве индикатора дефектности, является величина локального температурного градиента.

Для контроля применяют пассивные и активные методы. При активном контроле объект подвергают воздействию от внешнего ис-

точника энергии, при пассивном такое воздействие отсутствует. Пассивный контроль в общем случае предназначен: для контроля теплового режима объектов; для обнаружения отклонений от заданной формы и геометрических размеров объектов контроля. В свою очередь активный контроль предназначен для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности (трещин, пористости, расслоений, инородных включений), а также изменений в структуре и физико-химических свойствах объекта контроля (неоднородность структуры, теплопроводность структуры, теплоемкость и коэффициент излучения).

В зависимости от способа получения информации различают также контактные и бесконтактные способы. В процессе технической диагностики чаще всего применяют бесконтактные способы, обладающие высокой оперативностью и минимальной трудоемкостью. Информация, получаемая бесконтактными тепловыми методами контроля, переносится оптическими электромагнитными излучениями в инфракрасной области. Интенсивность и частота инфракрасного излучения определяется энергией колебательного и вращательного движения молекул и атомов объекта и зависит от его температуры. Основным способом генерирования инфракрасного излучения является нагрев объекта, поэтому это излучение чаще называют тепловым.

В качестве основных приборов, регистрирующих это излучение, в настоящее время наиболее широкое применение нашли дистанционные инфракрасные пирометры и тепловизоры. Наибольшие перспективы имеют тепловизоры, позволяющие преобразовать тепловое изображение объекта в видимое. Метод тепловизионного контроля позволяет получать как локальные, так и обзорные тепловые изображения объекта — термограммы, позволяющие выявлять участки с различными температурами поверхности. Примеры термограмм, полученных тепловизионным методом, показаны на рис. 8.5 и форзацах. На рис. 8.6 приведен общий вид применяемой в инженерном

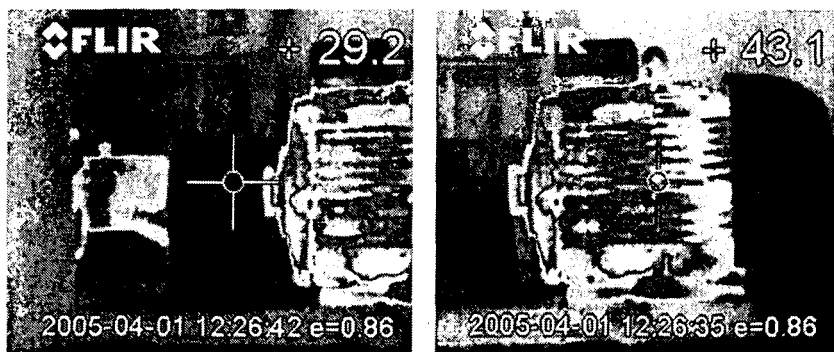
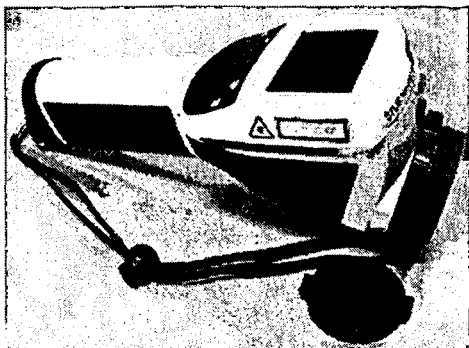


Рис. 8.5. Контроль нагрева электродвигателя и промежуточного подшипника трансмиссионного вала

Рис. 8.6. Тепловизионная камера
ThermaCAM E25



центре АГТУ портативной тепловизионной промышленной камеры ThermaCAM E25, производимой фирмой «FLIP Systems». В дальнейшем термограммы обрабатывают на компьютере, где в зависимости от уровня сложности используемой программы может осуществляться измерение температур по точкам, построение изотерм, определение средних, максимальных и минимальных температур различных областей, оценка температурного градиента в исследуемой области и т.д.

Дистанционные методы теплового вида неразрушающего контроля широко применяют при технической диагностике нефтегазового оборудования. Так, с их помощью осуществляют обнаружение утечек нефтепродуктов из емкостей, резервуаров и трубопроводов, оценивают состояние их изоляционных покрытий и утонение стенок, выявляют несанкционированные подключения к трубопроводам и нарушения залегания их в грунте (разрушение насыпи и обваловки, всплываний и обнажений трубы, деформации трубы из-за сезонных подвижек грунтов и т.д.), осуществляют контроль напряженного состояния металла, выявляют наиболее теплонапряженные узлы машинного оборудования, электрооборудования и т. п.

Весьма эффективно применение тепловизоров при контроле состояния изоляции резервуаров, аппаратов и трубопроводов. Наличие дефектных участков определяют по увеличению теплопотерь через изоляцию, что позволяет выявить причину и провести своевременный ремонт или замену изоляции.

Тепловизионный контроль является одним из немногих экспресс-методов, позволяющих эффективно выявлять дефекты и определять концентрацию напряжений в емкостном технологическом оборудовании больших габаритных размеров. Методику такого контроля применяют, например, при диагностировании вертикальных стальных резервуаров для нефтепродуктов (РД 153-112-017-97). Местоположение концентраторов напряжений в резервуаре при этом выявляют по повышенному инфракрасному излучению, возникающему при упругопластическом деформировании металлоконструкций резервуара нагрузочными тестами. Циклическое нагружение

стенки резервуара осуществляют путем заполнения его жидкостью, при этом перед началом нагружения регистрируют температурное поле стенки — «нулевой кадр». Далее резервуар нагружают тестовой нагрузкой (наполняют) и фиксируют соответствующие термограммы. Коэффициент концентрации напряжений определяют отношением приращения максимального уровня температур в области дефекта к приращению температуры в бездефектном участке в относительных или абсолютных единицах измерения.

Для получения абсолютных значений температур в программу обработки тепловизионного изображения вводят коэффициент излучения поверхности объекта и температуру окружающей среды. При обработке тепловизионных изображений для исключения собственных тепловых полей объекта вычитают «нулевой кадр», полученный перед нагружением, из последующих, полученных после тестового нагружения, и анализируют только приращение температурного поля, вызванное нагрузочным тестом.

Коэффициент концентрации напряжений в области дефекта определяют отношением приращения температуры в области концентратора и бездефектной области:

$$\alpha_1^T = \frac{\Delta t_g}{\Delta t_0},$$

где Δt_g — приращение температуры в области дефекта; Δt_0 — приращение температуры в бездефектной области.

Данный метод позволяет устойчиво выявлять дефекты и концентраторы напряжений при достижении в этих зонах при тестовой нагрузке напряжений, достигающих 0,9 предела текучести и выше.

9. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Ультразвуковой контроль (УЗК) относится к акустическому виду неразрушающего контроля (см. табл. 1.2). Все многообразие акустических методов неразрушающего контроля основано на взаимодействии упругих сред (жидких, твердых и газообразных) с акустическими колебаниями и волнами. Они отличаются способами возбуждения колебаний и их регистрацией.

Из числа акустических методов чаще всего применяют ультразвуковую дефектоскопию (УЗД), ультразвуковую толщинометрию (УЗТ) и акустико-эмиссионный неразрушающий контроль. На УЗД в мировой практике приходится в настоящее время 60 % всего объема неразрушающего контроля.

В нефтегазовой отрасли УЗД применяют, например, при контроле корпусов вертлюгов, осей талевых блоков, замков бурильных труб, сварных соединений резервуаров и трубопроводов и т. д. УЗТ является основным методом определения остаточной толщины стенок нефтегазового оборудования. Акустико-эмиссионный контроль широко применяют для интегральной оценки технического состояния и оценки степени опасности имеющихся дефектов различного оборудования, и в первую очередь емкостного: сосудов, трубопроводов и резервуаров различного назначения (см. гл. 10).

Первый патент (№ 11371) на метод неразрушающего контроля с использованием акустических ультразвуковых волн с приоритетом от 2 февраля 1928 г. выдан профессору Ленинградского электротехнического института Сергею Яковлевичу Соколову. Именно от этой даты мировая общественность ведет отсчет начала применения УЗД. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля УЗД позволяет выявлять дефекты любой формы независимо от их глубины, обладает высокой производительностью, низкой стоимостью, возможностью контроля изделия при одностороннем доступе. Недостатками являются трудности контроля крупнозернистых материалов, а также тонкостенных изделий с толщиной 4 мм и меньше. Контроль изделий сложной формы требует разработки специальных методик или технологических инструкций.

9.1. Акустические колебания и волны

Акустические колебания представляют собой механические колебания частиц упругой среды. Процессы распространения этих колебаний в среде называют **акустическими волнами**. Линию, указывающую направление распространения волны, называют *лучом*, а грани-

цу раздела колеблющихся частиц от неколеблющихся — *фронтом волны*.

Акустические колебания характеризуются частотой, интенсивностью и видом. Виды колебаний в основном определяются свойствами упругой среды и способом их создания. В жидкостях и газах, обладающих упругостью объема, акустические колебания распространяются с одинаковой скоростью во всех направлениях. В твердых телах, характеризующихся помимо упругости объема еще и упругостью формы (сдвиговой упругостью) и неодинаковостью деформаций растяжение—сжатие по различным направлениям (для анизотропных тел), закономерности распространения акустических волн значительно сложнее.

Колебания с частотой до 16...20 Гц называют инфразвуковыми. Колебания с частотой от 16...20 до $(15...20)10^3$ Гц составляют диапазон слышимости, воспринимаемый человеческим ухом. При увеличении частоты колебаний звука более 20 кГц он переходит в ультразвук; при этом способность его распространения меняется: в воздухе способность распространения уменьшается, в твердых и жидких средах — увеличивается. При неразрушающем контроле металлических материалов используются частоты ультразвукового диапазона 0,5...25 МГц.

Распространение акустической ультразвуковой волны в материале происходит с определенной постоянной скоростью C , определяемой свойствами среды (следует отличать скорость ультразвуковой волны C от скорости колебания упругих частиц v , которая зависит от фазы колебаний). Распространение волны сопровождается образованием в материале зон, в которых частицы находятся в одинаковом колебательном состоянии (фазе). Минимальное расстояние между такими зонами называют длиной волны λ . Величина λ связана со скоростью распространения C и частотой колебаний f выражением

$$\lambda = C/f.$$

Изменить длину ультразвуковой волны в конкретном материале можно только путем изменения частоты f возбуждаемых колебаний.

Направление колебаний частицы в твердых телах может быть различным по отношению к направлению распространения волны. По характеру смещения частиц и распространению колебаний волны бывают нескольких типов.

Для пояснения характера деформации твердого тела при распространении в нем упругих волн на боковую поверхность тела наносят симметричную равномерную решетку. При распространении упругих колебаний (волн) тело деформируется вместе с нанесенной решеткой. Характер деформации тела при распространении в нем упругих волн некоторых типов приведен на рис. 9.1 [5]. При этом величина деформаций показана утрированно увеличенной (на самом деле деформации очень малы и измеряются долями процента от длины волны).

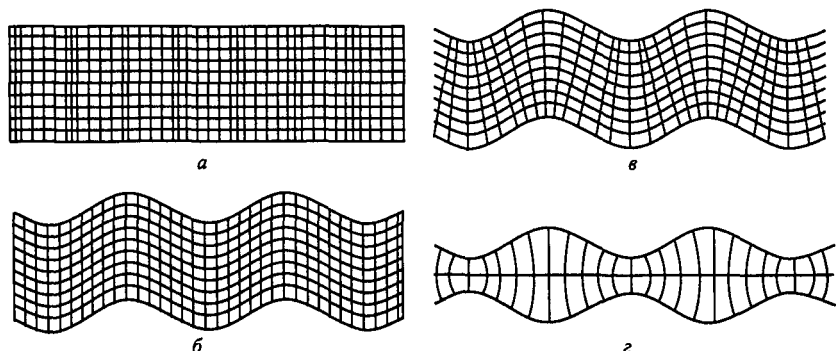


Рис. 9.1. Характер деформации твердых тел при распространении в них упругих волн некоторых типов:

а — продольные (растяжение—сжатие); *б* — поперечные (сдвиговые); *в* — нормальные несимметричные (изгибные); *г* — нормальные симметричные (нормальные расширения—сжатия)

Продольными называют волны, когда частицы упругой среды колеблются в направлении распространения волны, подвергаясь при этом поочередно деформациям растяжения—сжатия. Скорость C_l продольной волны определяют по формуле

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}},$$

где E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность среды.

Если частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения, испытывая деформации сдвига, такие волны называют *поперечными* или *сдвиговыми*. Поперечные волны могут возникать только в твердых средах, обладающих сдвиговой упругостью. Скорость поперечной волны $C_t \sim 0,55 C_l$.

На поверхности твердого тела могут распространяться *поверхностные* волны (волны Рэлея). Они состоят из комбинации продольных и поперечных волн и имеют скорость распространения $C_s = 0,93 C_t$. Колебания частиц происходят по эллиптической траектории, при этом большая ось эллипса перпендикулярна поверхности. В металлах поверхностные волны практически затухают на глубине, превышающей $1,5\lambda$. Вместе с тем поверхностные волны распространяются на большие расстояния, следуя изгибам поверхности. Если среда ограничена двумя поверхностями, расстояние между которыми соизмеримо с длиной волны, то в такой тонкой пластине распространяются нормальные *пластинчатые* волны (их называют также волнами Лэмба). Характеристики основных типов волн приведены в табл. 9.1 [2, 4].

Таблица 9.1

Среда распространения	Тип (название) волны	Характеристика волны	Скорость распространения
Жидкость или газ	Продольные (растяжения–сжатия)	Периодические расширения и сжатия среды	C
Безграничное твердое тело	Продольные (растяжения–сжатия, безвихревые)	Частицы колеблются в направлении распространения волны	C_l
	Поперечные (сдвига, эквиволлюминальные)	Частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны	$C_t \sim 0,55C_l$
Поверхность полубезграничного тела	Поверхностные (Рэлея)	Волна распространяется по поверхности	$C_s \sim 0,93 C_t$
	Головные (ползущие)	Быстро затухают вдоль поверхности вследствие переизлучения	C_l
Бесконечная пластина толщиной h	Нормальные несимметричные (изгибные, Лэмба)	Изгиб пластины со сдвигом	$C_{pq0} \rightarrow 0$ при $h/\lambda \rightarrow 0$
	Нормальные симметричные (нормальные расширения–сжатия, Лэмба)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров	$C_{ps0} \sim 0,9C_l$ при $h/\lambda \rightarrow 0$
Бесконечный стержень диаметром d	Изгиба	Изгиб стержня со сдвигом	$C_{bq0} \rightarrow 0$ при $d/\lambda \rightarrow 0$
	Продольные (растяжения–сжатия)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров	$C_{bs0} \sim 0,86C_l$
Бесконечный стержень или труба	Крутильные	Вращение элементов вокруг оси	$C_{bt} = C_t$

В зависимости от источника возбуждения могут возникать и другие виды волн: сферические, возбуждаемые точечным источником, размеры которого меньше длины волны, цилиндрические, которые возбуждаются цилиндрическим источником (стержнем), длина которого значительно больше поперечных размеров, и др.

При проведении УЗД и УЗТ металла и сварных соединений используют в основном поперечные и продольные волны.

9.2. Затухание ультразвука

Распространение ультразвуковой волны, вызванной колебательными движениями возбужденных частиц благодаря упругим силам между ними, сопровождается переносом энергии. Количество энергии, переносимое волной за 1 с через 1 см² площади, перпендику-

лярной направлению распространения, называют **интенсивностью ультразвука**. Интенсивность ультразвуковых колебаний частиц обычно невелика (энергия волны не более 100 Вт/см²) и не выходит за пределы упругих деформаций, где напряжения и деформации связаны линейной зависимостью.

Интенсивность ультразвука по мере прохождения в среде уменьшается за счет ее волнового сопротивления z . Величина этого сопротивления, часто называемого характеристическим импедансом, зависит от плотности среды ρ , скорости распространения волн C и определяется выражением

$$z = \rho C.$$

Размерность волнового сопротивления (характеристического импеданса) составит: $[z] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Заменяем $\text{кг} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$ (масса равна силе, деленной на ускорение). Отсюда размерность $[z] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \frac{\text{с}}{\text{м}} = \text{Па} \cdot \text{с/м}$.

Интенсивность ультразвука J пропорциональна квадрату амплитуды упругого смещения и квадрату частоты колебаний:

$$J = 2\pi^2 z U^2 f^2,$$

где U — амплитуда упругого смещения частиц среды; f — частота колебаний.

Из последнего выражения следует, что чем большим акустическим сопротивлением обладает среда, тем большая энергия требуется для возбуждения в ней волн заданной частоты и амплитуды. По мере прохождения волны от источника излучения амплитуда упругого смещения частиц уменьшается и интенсивность ультразвука падает. Затухание интенсивности происходит по двум основным причинам: поглощения и рассеяния. Коэффициент затухания α соответственно состоит из двух слагаемых:

$$\alpha = \alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{рас}},$$

где $\alpha_{\text{погл}}$ — коэффициент поглощения, определяемый вязкостью среды и частотой колебаний; $\alpha_{\text{рас}}$ — коэффициент рассеяния, зависящий от структуры, упорядоченности расположения и размера зерен кристаллов.

Поглощение — это процесс перехода энергии колебаний в тепловую, обусловленный трением колеблющихся частиц. Поглощение будет тем больше, чем больше частота колебаний. При рассеянии происходят преломление и трансформация ультразвуковых волн. Рассеяние обусловлено кристаллической структурой металлов и сплавов. При прохождении ультразвуковой волны через границы кристаллов волна частично отражается, преломляется и трансформи-

руется. Рассеяние по этим причинам может быть значительным. Максимальное рассеяние имеет место при $\lambda \sim (1...4)\bar{D}$, где $\bar{D}$ — средний размер зерна.

В углеродистых сталях зерна состоят из большого числа хаотично расположенных мелких пластинок перлита и цементита (Fe_3C). Размеры их значительно меньше длины волны, и затухание ультразвука определяется в основном поглощением. В аустенитных сталях и особенно в сварных соединениях происходит упорядочение ориентации кристаллов, а их размеры становятся соизмеримы с длиной волны. Поэтому в связи с повышенным рассеянием проведение УЗД таких сталей часто затруднено или невозможно.

Снижение интенсивности ультразвука вследствие его затухания в зависимости от пройденного в материале расстояния происходит по экспоненциальному закону:

$$J_{(x)} = J_0 e^{-2\alpha x},$$

где $J_{(x)}$ — интенсивность ультразвука на расстоянии x от источника излучения, интенсивность излучения которого J_0 ; α — коэффициент затухания.

Чем больше коэффициент затухания, тем значительно ослабление ультразвука, а следовательно, меньше глубина его проникновения. Поскольку амплитуда волны пропорциональна корню квадратному из интенсивности ультразвука, влияние затухания на амплитуду описывается формулой

$$U_x = U_0 e^{-\alpha x}.$$

Для оценки ослабления в большинстве случаев нет необходимости определять интенсивность J или амплитуду U в абсолютных единицах. Чаше бывает достаточно определить их величину относительно некоторого постоянного (опорного) уровня (J_0 ; U_0). В этом случае для выражения относительной величины $J/J_0 = U/U_0$ используют специальные единицы — децибелы. Число децибел N определяют по формулам

$$N = 10 \lg \frac{J}{J_0}; \quad N = 20 \lg \frac{U}{U_0}.$$

В практике УЗД, когда контролируется соотношение амплитуд колебаний, для определения N обычно используют вторую формулу.

Децибельная шкала очень удобна, поскольку амплитуды могут отличаться на 1...3 порядка, т. е. в 10, 100, 1000 раз. В единицах измерения это увеличение составит соответственно 20, 40, 60 дБ, т. е. это величины одного порядка. Кроме того, эти величины, согласно основным свойствам логарифмов, можно суммировать и вычитать. Например, если известно затухание (ослабление) ультразвука в деци-

белах при прохождении отдельных участков пути ультразвуковой волны, то результирующее затухание определится как сумма составляющих затухания на каждом участке.

Для пересчета относительных единиц U/U_0 в децибелы и обратно можно воспользоваться табл. 9.2.

Таблица 9.2

дБ	Относительные единицы	дБ	Относительные единицы	дБ	Относительные единицы
60	1000	4	1,58	-5	0,56
50	316	3	1,41	-6	0,5
40	100	2	1,26	-10	0,316
30	31,6	1	1,12	-20	0,1
20	10	0	1	-30	0,0316
10	3,16	-1	0,89	-40	0,01
6	2	-2	0,79	-50	0,00316
5	1,78	-4	0,63	-60	0,001

9.3. Трансформация ультразвуковых волн

Трансформация (расщепление и изменение типа) ультразвуковых волн происходит при прохождении ими границы раздела двух сред под некоторым углом. При падении волны на границу раздела сред в общем случае часть энергии проходит во вторую среду, а часть отражается в первую. При нормальном падении (перпендикулярном поверхности раздела) расщепления и изменения типа волны не происходит и та часть энергии, которая проходит во вторую среду, распространяется в ней в том же направлении.

Коэффициент отражения R , характеризующий интенсивность отраженной волны, зависит от акустического сопротивления первой z_1 и второй z_2 сред и определяется по формуле

$$R = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2.$$

Коэффициент отражения R не зависит от угла падения волны и растет с увеличением разницы акустических сопротивлений сред. Явление отражения ультразвуковой волны от границы перехода в среду с малым акустическим сопротивлением широко используется в ультразвуковой дефектоскопии. Например, при переходе ультразвуковой волны из стали в воздух интенсивность отраженной волны составляет более 90 %. Аналогичный эффект возникает при обнаружении внутри металла областей (объемов) с малым акустическим со-

противлением: газовых пузырей, пустот, инородных включений и других несплошностей. Для получения заметного отражения достаточно, чтобы размеры несплошности были соизмеримы с длиной волны. При меньших размерах волна огибает несплошность без существенного отражения.

Переход ультразвуковой волной границы раздела двух сред под некоторым углом сопровождается как отражением и преломлением, так и трансформацией: расщеплением падающей волны и появлением иных типов волн. Так, при падении из первой среды продольной волны C_{1l} на границу раздела сред под некоторым углом β_{1l} в общем случае могут возникнуть еще четыре волны. Схема их образования приведена на рис. 9.2, где C_{1l} — падающая и отраженная продольная волна; C_{1r} — отраженная поперечная (трансформированная) волна; C_{2l} — преломленная продольная волна; C_{2r} — преломленная поперечная волна.

Все углы отсчитываются от перпендикуляра к границе в точку раздела волн. Углы прохождения волн во второй среде (углы преломления) определяются ее акустическим сопротивлением. С увеличением угла падения β_{1l} углы преломления α_{2l} и α_{2r} увеличиваются. Углы падения, отражения и преломления связаны со скоростью распространения этих волн соотношением (законом Снелиуса)

$$\frac{\sin \beta_{1l}}{C_{1l}} = \frac{\sin \beta_{1r}}{C_{1r}} = \frac{\sin \alpha_{2l}}{C_{2l}} = \frac{\sin \alpha_{2r}}{C_{2r}}.$$

При увеличении α_{2l} до 90° продольная волна во второй среде исчезает. Значение угла падения β_{1l} в этом случае называют первым критическим углом $\beta_{кр1}$ (рис. 9.3). Значение угла падения, при котором во второй среде исчезает и поперечная волна ($\alpha_{2r} = 90^\circ$), называют вторым критическим углом $\beta_{кр2}$.

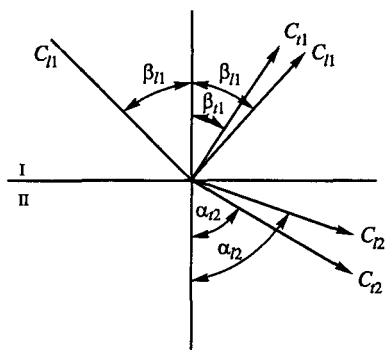


Рис. 9.2. Схема отражения, преломления и трансформации продольных волн

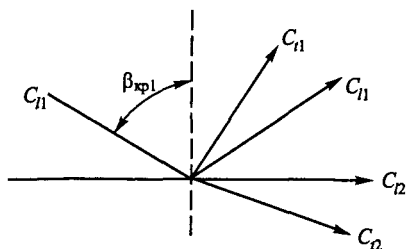


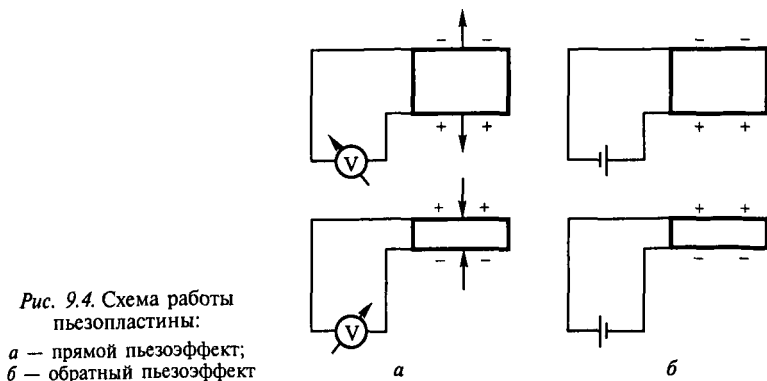
Рис. 9.3. Схема образования первого критического угла

9.4. Способы получения и ввода ультразвуковых колебаний. Конструкция пьезопреобразователей

Существует ряд способов возбуждения ультразвуковых колебаний, в том числе механический, радиационный, лазерный, магнитный и др. [2, 4, 5]. В практике диагностирования в полевых условиях для получения и ввода ультразвуковых колебаний применяют специальные устройства — преобразователи, основанные на использовании электромагнитно-акустического (ЭМА) и пьезоэлектрического эффектов. Важным преимуществом ЭМА-преобразователей является возможность контроля бесконтактным методом через слой изоляции. Вместе с тем такие преобразователи, в силу их конструктивных особенностей и низкого коэффициента преобразования, используются для прозвучивания поперечными и продольными волнами по нормали к поверхности объекта контроля и применяются в основном для толщинометрии металлоконструкций.

Наиболее распространенным является способ, основанный на явлении *пьезоэлектрического эффекта*. Физическая сущность этого эффекта заключается в том, что при механическом растяжении или сжатии на поверхности пластин некоторых твердых материалов появляются электрические заряды противоположного знака — возникает прямой пьезоэффект; наоборот, при подаче на поверхность пластин переменных электрических зарядов пластинка начинает сжиматься и разжиматься — имеет место обратный пьезоэффект. Такими свойствами обладает ряд природных и искусственных материалов: кварц, турмалин, сегнетова соль, титанат бария, цирконат-титанат свинца (ЦТС) и др. Схема возникновения прямого и обратного пьезоэффекта приведена на рис. 9.4.

При реализации обратного пьезоэффекта механически вибрирующая пьезопластинка играет роль «молоточка», посылающего пучок упругих колебаний в контролируемый материал. Одновременно та же пластинка под действием прямого пьезоэффекта может слу-



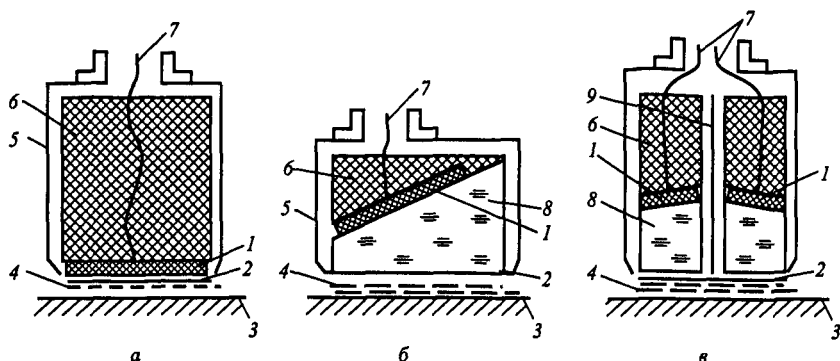


Рис. 9.5. Основные типы пьезопреобразователей:
а — прямой; б — наклонный; в — раздельно-совмещенный

жить преобразователем механических колебаний в электрические сигналы. Пьезопластинки являются основным элементом пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), предназначенных для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. Основные преимущества ПЭП, обуславливающие их широкое применение, — высокая эффективность преобразования (высокая чувствительность) и простота конструкции. Используют три основные схемы конструктивного исполнения контактных ПЭП (рис. 9.5): прямые, наклонные, раздельно-совмещенные [4].

На поверхности пьезопластины 1 методом осаждения или напыления наносят серебряные или медные электропроводные покрытия, одно из которых с помощью проводника 7 подключается к электрическому разъему ПЭП, а другие — к металлическому корпусу 5. Толщина пьезопластины принимается равной половине длины волны в пьезоматериале на рабочей частоте ПЭП. В прямых ПЭП (рис. 9.5, а) пьезопластина одной стороной приклеена к демпферу 6, а другой стороной — к протектору 2. Протектор служит для защиты пьезопластины от механических повреждений и должен обладать высокой износостойкостью. Демпфер в свою очередь служит для гашения свободных колебаний пьезопластины и получения коротких импульсов.

Наклонный ПЭП (рис. 9.5, б) отличается от прямого наличием призмы 8, служащей для ввода упругих волн под углом к поверхности изделия. Угол призмы наклонного преобразователя выбирают таким, чтобы в изделие проходили волны одного типа в интервале между первым и вторым критическими углами. Призму обычно изготавливают из плексигласа, капролона или других материалов с высоким затуханием ультразвука, что обеспечивает быстрое затухание не вошедшей в изделие волны.

Раздельно-совмещенный ПЭП (рис. 9.5, в) представляет собой двоянный наклонный ПЭП с малым углом призмы (обычно не бо-

лее 10°). Одна половина раздельно-совмещенного ПЭП работает на излучение, а вторая на прием. Для предупреждения прямой передачи сигналов от излучателя к приемнику имеется акустический разделительный экран 9. Угол призмы 8 выбирается в диапазоне от $0...10^\circ$, что позволяет вводить в изделие волны одного типа без их трансформации. Изменяя углы призмы, их высоту и расстояние между ними, изменяют минимальную и максимальную глубину прозвучивания изделия. Раздельно-совмещенные ПЭП сложнее по конструкции, не являются универсальными (предназначены для конкретных глубин прозвучивания), но имеют значительно более низкий уровень помех.

Помимо рассмотренных выше существует большое число различных специальных пьезопреобразователей. Так, например, для контроля труб (особенно с малой толщиной стенки) применяют раздельно-совмещенные пьезопреобразователи «хордового» типа. Их использование позволяет существенно повысить надежность контроля сварных стыков труб, что является для нефтегазовой отрасли весьма актуальным.

Используют различные способы ввода ультразвуковых колебаний от ПЭП в объект контроля: бесконтактный воздушный способ, контактный способ и иммерсионный способ. Бесконтактный воздушный способ иногда применяют для контроля изделий из пластмассы и композитных материалов; для контроля металлов этот способ не используется из-за большой разницы волновых сопротивлений. Иммерсионный способ предусматривает создание акустического контакта через слой жидкости. Для этого контролируемое изделие необходимо поместить в ванну с жидкостью (водой) либо применить струйный контакт через струю жидкости.

В подавляющем большинстве случаев используют контактный способ с применением контактной смазки (жидкости). Контактная смазка 4 (см. рис. 9.5) служит для обеспечения акустического контакта и передачи ультразвуковых колебаний в объект контроля 3 и обратно. Толщина смазки должна быть меньше длины волны ультразвука в ней. Это достигается путем прижатия ПЭП к поверхности объекта контроля. Изменение толщины контактной смазки влияет на количественные результаты контроля, поэтому для повышения стабильности результатов при контактном способе контролируемую поверхность предварительно зачищают до шероховатости не хуже $Rz40$.

Ультразвуковым волнам присущи общие закономерности распространения в соответствии с явлениями дифракции (огибания) и интерференции (сложения). При размерах излучателя, меньших длины волны, от него распространяются сферические волны, и излучение является ненаправленным. Если размеры излучающей пьезопластины существенно больше размеров длины волны, то ультразвуковые волны будут распространяться в виде направленного пучка. В непосредственной близости от излучателя (в зоне Френеля) пучок волн распространяется почти без расхождения, а интенсивность колебаний вдоль пучка непостоянна, имеет скачкообразный характер и

определяется явлением интерференции. Протяженность ближней зоны $r_{\text{бл}}$ определяется скоростью распространения колебаний C в среде, их частотой f и размером (радиусом) a излучающей пластины:

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2 f}{C}.$$

При удалении от излучателя на расстояние $r > r_{\text{бл}}$ пучок колебаний распространяется с расхождением под некоторым углом φ_p , величина которого определяется соотношением

$$\varphi_p = \arcsin\left(0,61 \frac{C}{af}\right).$$

Интенсивность колебаний в этой зоне (зоне Фраунгофера) вдоль оси пучка будет монотонно убывать в соответствии с закономерностями затухания. Направленность пучка ультразвуковых колебаний улучшается с увеличением произведения af . Интенсивность колебаний в поперечном сечении дальней зоны непостоянна и убывает по направлению от оси пучка к его периферии. Характер изменения интенсивности в зависимости от угла между направлением луча и осью пучка определяется диаграммой направленности излучателя. Длина луча, направленного под некоторым углом к оси пучка, в пределах диаграммы направленности пропорциональна амплитуде колебаний в этом направлении. Поэтому от отражателей (дефектов), расположенных на одинаковом расстоянии от излучателя, но под разными углами к оси пучка, поступают сигналы, разные по амплитуде. Максимальная амплитуда сигнала будет при расположении отражателя на оси пучка. Типовая диаграмма направленности дискового излучателя в полярных координатах приведена на рис 9.6. За единицу принимают амплитуду звукового давления U_0 на оси пучка.

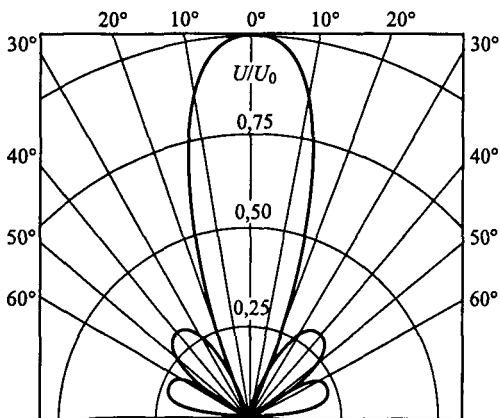


Рис. 9.6. Диаграмма направленности дискового излучателя

При уменьшении угла расхождения φ_p увеличивается протяженность ближней зоны $r_{бл}$. При $af/C \leq 0,6$ в диаграмме направленности возникают боковые лепестки, в которых сосредоточивается до 20 % энергии. В отдельных случаях боковые лепестки могут отражаться от дефектов и давать соответствующие сигналы.

9.5. Аппаратура, методы и технология ультразвукового контроля

Обнаружение и измерение имеющихся в конструкции дефектов осуществляют с помощью ультразвуковых дефектоскопов специального или общего назначения. Структурная схема импульсного ультразвукового эхо-дефектоскопа общего назначения приведена на рис. 9.7.

Импульс ультразвуковых механических колебаний, посылаемых в контролируемое изделие, создается в пьезопреобразователе за счет обратного пьезоэффекта. Для этого на пьезоэлемент пьезопреобразователя подается короткий электрический импульс, вырабатываемый генератором зондирующих импульсов. Отраженный от донной поверхности или от дефекта механический импульс УЗК принимается тем же или другим пьезопреобразователем, работающим в режиме приема, и преобразовывается посредством прямого пьезоэффекта в электрический сигнал. Далее сигнал, усиленный с помощью усилителя, подается на вертикальные отклоняющие элементы экрана, определяющие положение луча на экране дефектоскопа по высоте. Одновременно с генератором зондирующих импульсов запускается генератор развертки,

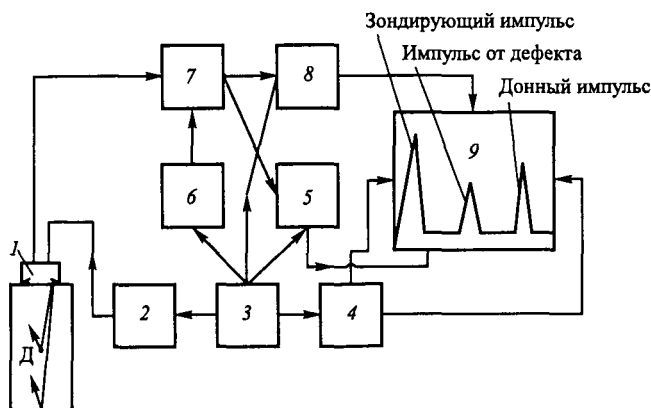


Рис. 9.7. Схема ультразвукового дефектоскопа:

1 — пьезопреобразователь; 2 — генератор зондирующих импульсов; 3 — синхронизатор; 4 — генератор горизонтальной развертки; 5 — глубиномер; 6 — блок временной регулировки чувствительности; 7 — усилитель; 8 — автоматический сигнализатор дефектов; 9 — экран дефектоскопа

который вырабатывает линейно увеличивающийся (пилообразный) импульс, подаваемый на горизонтальные отклоняющие элементы экрана, для развертки луча в горизонтальной плоскости. Сигналы, поступившие от дефекта (Д) или противоположной стороны изделия (донный сигнал), вместе с зондирующим импульсом появляются на экране дефектоскопа в виде пиков соответствующей амплитуды. Положение этих пиков на горизонтальной оси определяется временем их прихода и зависит от скорости УЗ колебаний в контролируемом изделии, а также глубины залегания дефекта или толщины изделия. С помощью глубиномера по времени прихода импульса и известной скорости распространения колебаний определяются соответственно глубина расположения дефектов и толщина изделия.

Автоматический сигнализатор дефектов (АСД) служит для выработки звукового или светового сигналов при появлении импульса от дефекта выше браковочного уровня. Для компенсации затухания колебаний и выравнивания амплитуд импульсов от равных по размерам, но расположенных на разной глубине дефектов, служит блок временной регулировки чувствительности (ВРЧ). Синхронизатор обеспечивает синхронную работу генератора зондирующих импульсов и генератора развертки, а также управляет работой блоков АСД, ВРЧ и глубиномера.

Современные ультразвуковые дефектоскопы позволяют получать на экране различные типы разверток, что существенно повышает информативность результатов контроля. Основной является развертка типа А, пример которой приведен на рис. 9.7. Развертка типа В позволяет визуализировать расположение дефектов по толщине изделия. Развертка типа С показывает расположение дефектов в плане в пределах проконтролированной зоны.

Наряду с перечисленными выше элементами неотъемлемой составной частью современных дефектоскопов является высокопроизводительный микропроцессор и соответствующее программное обеспечение. Ультразвуковые дефектоскопы последнего поколения, созданные на базе микропроцессорной техники, обладают большими функциональными возможностями. Их электронные и дефектоскопические параметры очень близки, так как во всех приборах используются практически одни и те же электронные компоненты. Помимо функциональных возможностей весьма важны также габариты и масса прибора. Самым легким и малогабаритным среди дефектоскопов общего назначения не только в России, но и в мире, на сегодняшний день является отечественный цифровой ультразвуковой дефектоскоп общего назначения А1212. На рис. 9.8 представлен дефектоскоп А1212, преобразователь которого установлен на стандартном образце СО-1.

Настройка уровня поисковой и браковочной чувствительности, а также эталонирование основных параметров ультразвуковых дефектоскопов осуществляются с помощью соответствующих стандартных образцов по ГОСТ 14782–86 или специальных стандартных образцов предприятий с искусственными отражателями, имитирующими де-

Рис. 9.8. Ультразвуковой дефектоскоп А1212 совместно со стандартным образцом СО-1



фекты. На рис. 9.9 приведен общий вид комплекта стандартных образцов КОУ-2.

Различные методы ультразвукового контроля отличаются схемами установки излучателя и приемника ультразвуковых колебаний, их положением относительно объекта контроля. Применяют теневой, зеркально-теневой, эхо-зеркальный и другие методы. Наиболее широкое распространение получил импульсный эхо-метод, основанный на отражении УЗ колебаний от несплошности и приеме отраженных эхо-сигналов. Амплитуда эхо-сигнала на экране дефектоскопа при этом будет пропорциональна размерам дефекта.

В эхо-методе различают три способа установки пьезопреобразователей:

- по раздельной схеме, предусматривающей использование двух пьезопреобразователей, один из которых выполняет функцию излучателя, другой — приемника;
- по раздельно-совмещенной схеме, когда излучатель и приемник монтируются в одном корпусе (см. рис. 9.5, в и 9.7);
- по совмещенной схеме, когда один пьезопреобразователь выполняет одновременно функции излучателя и приемника.

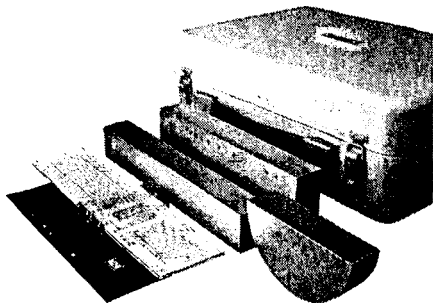


Рис. 9.9. Комплект стандартных образцов КОУ-2

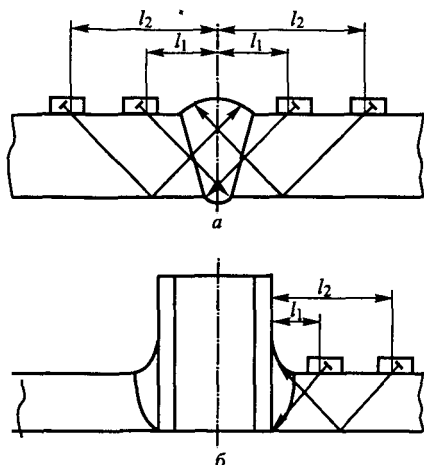


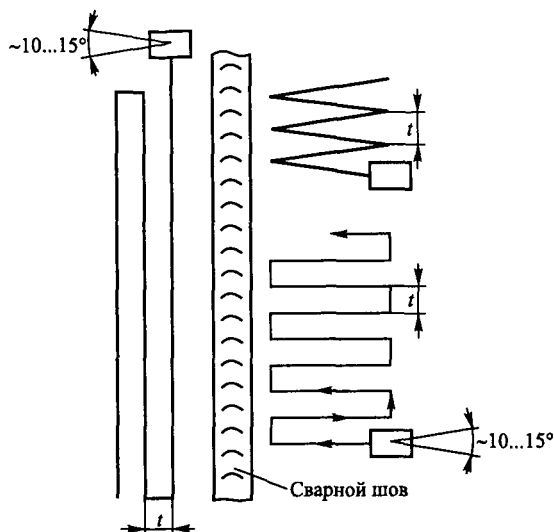
Рис. 9.10. Схемы прозвучивания сварных соединений:

a — прозвучивание стыкового сварного шва с неудаленным усилением; *б* — прозвучивание углового сварного шва

Последний способ применяют чаще всего. В зависимости от местоположения пьезопреобразователя контроль (прозвучивание) может осуществляться прямым, а также одно- и многократно отраженным лучом. В качестве примера на рис. 9.10 приведены схемы прозвучивания поперечных сечений некоторых типов сварных соединений. Удаление пьезопреобразователя от сварного шва (l_1 , l_2) определяется соответствующим геометрическим расчетом. Для контроля сварного шва по всей его длине осуществляется соответствующее перемещение пьезопреобразователя (сканирование). При механизированном контроле перемещение осуществляется с помощью механического приводного устройства. При ручном перемещении применяют поперечно-продольный или продольно-поперечный способы сканирования. При поперечно-продольном способе пьезопреобразователь перемещается возвратно-поступательно в направлении, перпендикулярном оси шва или под небольшим углом к ней с шагом t . Шаг сканирования t обычно принимается равным половине диаметра пьезопластины преобразователя. При продольно-поперечном способе пьезопреобразователь перемещается вдоль шва. Различные способы сканирования представлены на рис. 9.11. В процессе сканирования пьезопреобразователь непрерывно поворачивают на угол $10...15^\circ$.

Наиболее надежный способ обнаружения внутренних дефектов реализуется при прозвучивании объекта контроля прямым лучом (см. рис. 9.10). Вместе с тем при контроле сварных швов с неудаленным усилением прозвучить удастся только корень шва и прилегающую к нему зону. Чем больше ширина валика усиления шва, тем меньше контролируемая зона. Особенно остра данная проблема при контроле сварных соединений малой толщины, например тонкостенных труб, где отношение высоты и ширины валиков усиления к толщине контролируемого металла значительно больше, а в центре

Рис. 9.11. Способы
ручного сканирования



шва образуется неконтролируемая зона. Кроме того, при контроле труб контактные поверхности пьезопреобразователей необходимо притирать с соответствующим радиусом кривизны.

В последние годы для контроля стыковых сварных соединений труб все шире стали использовать раздельно-совмещенные пьезопреобразователи «хордового» типа, изготавливаемые, например, НПП «Политест» (Г.А. Гиллер, Л.Ю. Могильнер). Эти пьезопреобразователи позволяют за счет расхождения ультразвукового пучка в пределах толщины стенки обеспечить практически равномерное (с одинаковой чувствительностью) прозвучивание всего сечения сварного шва прямым лучом и в значительной мере избавиться от помех, возникающих при использовании совмещенного преобразователя: сигналов от неровностей валиков усиления; сигналов, возбуждаемых поверхностными волнами; реверберационных шумов совмещенного пьезопреобразователя.

Такие условия контроля обеспечиваются потому, что призмы раздельно-совмещенного пьезопреобразователя наклоняют в пространстве по отношению к оси трубы под определенными углами, а расстояние между ними $2L$ (длина хорды) выбирают из соотношения $2L = \sqrt{4R\delta - \delta^2}$, где R и δ — соответственно радиус кривизны наружной поверхности и толщина стенки трубы. Схема прозвучивания сварного стыка трубы с помощью раздельно-совмещенного пьезопреобразователя хордового типа приведена на рис. 9.12.

Ультразвуковые колебания, излучаемые пьезопреобразователем, вводятся в трубу в точке A (рис. 9.13). При наличии в изделии дефекта (отражателя D) волна, падающая на него, зеркально отражается в направлении приемного преобразователя в точку B . Угол ввода

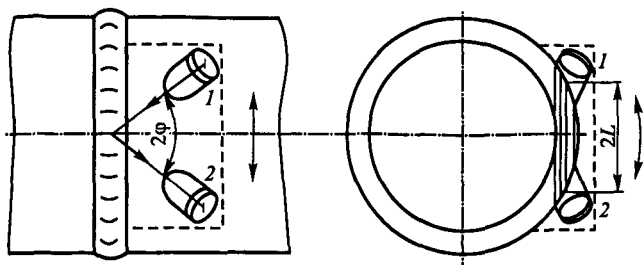


Рис. 9.12. Прозвучивание стыкового сварного соединения пьезопреобразователем хордового типа:

1 — излучающий преобразователь; 2 — то же, приемный

ультразвуковой волны α и угол разворота центральных лучей φ выбирают таким образом, чтобы центральные лучи диаграмм направленности излучающего и приемного преобразователей и точки A и B находились в одной плоскости, проходящей через середину толщины стенки сечения трубы. Соответствующие углы определяют по формулам

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{L}{m};$$

$$\alpha_0 = \arccos \frac{L}{m};$$

$$\alpha = \arcsin \frac{L^2}{\sqrt{(L^2 + m^2)}},$$

где m — расстояние между хордой AB и отражателем D .

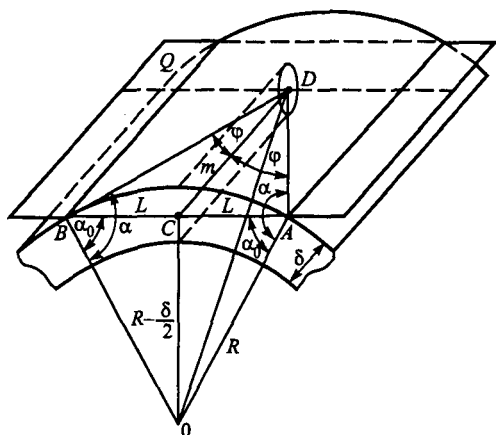


Рис. 9.13. Схема определения углов ввода пьезопреобразователя хордового типа

Контроль сварных стыков труб с помощью раздельно-совмещенного пьезопреобразователя хордового типа производится путем перемещения пьезопреобразователя только вдоль сварного стыка, одновременно совершая при этом незначительные (до ± 2 мм) возвратно-поступательные перемещения. Контроль выполняется с каждой стороны сварного шва.

Разнообразие методических приемов ультразвукового контроля различных деталей и элементов обуславливается многообразием их конструктивного исполнения. Для наиболее ответственных деталей и элементов нефтегазового оборудования разработаны соответствующие технологические инструкции, регламентирующие методику их контроля (например, стволов вертлюгов, осей кронблоков, замков бурильных труб, валов турбобуров и др.).

Для механизированного контроля магистральных трубопроводов применяются внутритрубные приборы-дефектоскопы (см.13.2), имеющие большое число преобразователей, расположенных по окружности с определенным шагом (обычно 8 мм). Измерительно-регистрирующая система таких приборов производит циклы измерений через каждые 3 мм по ходу движения, благодаря чему в пределах контролируемого участка трубопровода выполняются миллионы измерений. Обработка результатов измерений на компьютере позволяет выявить участки трубопровода с утонением стенок и наличием наружных и внутренних дефектов.

Ультразвуковые толщиномеры предназначены в основном для определения толщины изделия и, в отличие от дефектоскопов, имеют существенно более простое устройство, меньшие габариты и массу. Например, у них отсутствуют блоки временной регулировки чувствительности, автоматического сигнализатора дефектов и др. (см. рис.10.7). При контроле толщины конструкций, подвергшихся сероводородному растрескиванию или расслоению, а также изготовленных из сталей с большим содержанием сульфидных включений, раскатов и др., часто совершаются ошибки, так как большинство толщиномеров определяют толщину изделия по пришедшему первым сигналу от дефекта или расслоения. Поэтому наиболее совершенные модели ультразвуковых толщиномеров снабжаются экранами, на которые выводится развертка типа А. Это позволяет выявить донный сигнал и отличить его от сигнала от расслоения.

Большинство моделей толщиномеров наряду с толщиной позволяет измерять также и скорость распространения или время распространения УЗ волны. Точное измерение этих параметров позволяет использовать ультразвуковые толщиномеры также и для других целей: например, для экспресс-анализа марки металла по скорости распространения в нем ультразвука. Перспективным также является применение высокоточных толщиномеров для контроля напряженного состояния и усилия затяжки болтов ответственного оборудования и агрегатов.

Известно, что вследствие акустоупругого эффекта скорость распространения УЗ волны зависит не только от материала объекта, но

и от его напряженного состояния. При одноосном напряженном состоянии и неизменной температуре задача контроля резко упрощается. Так, по известному времени распространения УЗ импульса на длине болта в незатянутом t и затянутом t_0 состоянии напряжение можно рассчитать по формуле

$$\sigma = E(t - t_0) / (t_0 k (1 - \beta E)),$$

где E — модуль упругости материала болта; β — акустоупругий коэффициент распространения УЗ волн; k — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений в гладкой и резьбовой частях болта:

$$k = (l_0 + l_p (d_0/d_p)^2) / l,$$

где l — общая длина болта; l_0 и l_p — длины гладкого и нарезанного участков; d_0 и d_p их диаметры.

Усилие затяжки болта определяют по формуле

$$F_3 = 0,25\pi d_0^2 \sigma = 0,25\pi d_0^2 E(t - t_0) / (t_0 k (1 - \beta E)).$$

Такой подход к определению F_3 является в настоящее время наиболее распространенным [17, т. 4, с. 183].

10. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МЕТОД

10.1. Источники акустической эмиссии

При разрушении почти все материалы издают звук («крик олова», известный с середины XIX столетия, треск ломающейся древесины, льда и др.), т. е. испускают акустические волны, воспринимаемые на слух. Большинство конструкционных материалов (например, многие металлы и композиционные материалы) начинают при нагружении испускать акустические колебания в ультразвуковой (неслышимой) части спектра еще задолго до разрушения. Изучение и регистрация этих волн стала возможной с созданием специальной аппаратуры. Особенно интенсивно работы в этом направлении стали развиваться с середины 60-х годов XX в. в связи с необходимостью контроля особо ответственных технических объектов: ядерных реакторов и трубопроводов АЭС, корпусов ракет и др.

Под **акустической эмиссией** (эмиссия — испускание, генерация) понимается возникновение в среде упругих волн, вызванных изменением ее состояния под действием внешних или внутренних факторов. Акустико-эмиссионный метод основан на анализе этих волн и является одним из пассивных методов акустического контроля. В соответствии с ГОСТ 27655—88 «Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения» механизмом возбуждения акустической эмиссии (АЭ) является совокупность физических и (или) химических процессов, происходящих в объекте контроля. В зависимости от типа процесса АЭ разделяют на следующие виды:

- АЭ материала, вызываемая динамической локальной перестройкой его структуры;
- АЭ трения, вызываемая трением поверхностей твердых тел в местах приложения нагрузки и в соединениях, где имеет место податливость сопрягаемых элементов;
- АЭ утечки, вызванная результатом взаимодействия протекающей через течь жидкости или газа со стенками течи и окружающим воздухом;
- АЭ при химических или электрических реакциях, возникающих в результате протекания соответствующих реакций, в том числе сопровождающих коррозионные процессы;
- магнитная и радиационная АЭ, возникающая соответственно при перемагничивании материалов (магнитный шум) или в результате взаимодействия с ним ионизирующего излучения;
- АЭ, вызываемая фазовыми превращениями в веществах и материалах.

Таким образом, АЭ — явление, сопровождающее едва ли не все физические процессы, протекающие в твердых телах и на их поверхности. Возможности регистрации ряда видов АЭ вследствие их мало-

сти, особенно АЭ, возникающих на молекулярном уровне, при движении дефектов (дислокаций) кристаллической решетки, ограничивается чувствительностью аппаратуры, поэтому в практике АЭ контроля большинства промышленных объектов, в том числе объектов нефтегазовой промышленности, используют первые три вида АЭ. При этом необходимо иметь в виду, что АЭ трения создает шум, приводит к образованию ложных дефектов и является одним из основных факторов, усложняющих применение АЭ метода. Кроме того, из АЭ первого вида регистрируются только наиболее сильные сигналы от развивающихся дефектов: при росте трещин и при пластическом деформировании материала. Последнее обстоятельство придает АЭ методу большую практическую значимость и обуславливает его широкое применение для целей технической диагностики.

Целью АЭ контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с несплошностями на поверхности или в объеме стенки объекта контроля, сварного соединения и изготавливаемых частей и компонентов. Все индикации, вызванные источниками АЭ, должны быть при наличии технической возможности оценены другими методами неразрушающего контроля.

10.2. Виды сигналов АЭ

Регистрируемую промышленной серийной аппаратурой АЭ разделяют на непрерывную и дискретную. *Непрерывная* АЭ регистрируется как непрерывное волновое поле с большой частотой следования сигналов, а *дискретная* состоит из отдельных различимых импульсов с амплитудой, превышающей уровень шума. Непрерывная соответствует пластическому деформированию (течению) металла или истечению жидкости или газа через течи, дискретная — скачкообразному росту трещин.

Размер источника излучения дискретной АЭ невелик и сопоставим с длиной излучаемых волн. Его можно представить в виде квазисточечного источника, расположенного на поверхности или внутри материала и излучающего сферические волны или волны других типов. При взаимодействии волн с поверхностью (границей раздела двух сред) происходит их отражение и трансформация. Волны, распространяющиеся внутри объемов материала, быстро слабеют из-за затухания. Поверхностные волны затухают с расстоянием значительно меньше объемных, поэтому они преимущественно и регистрируются приемниками АЭ.

Регистрация сигнала от источника АЭ осуществляется одновременно с шумом постоянного или переменного уровня (рис. 10.1) [7]. Шумы являются одним из основных факторов, снижающих эффек-

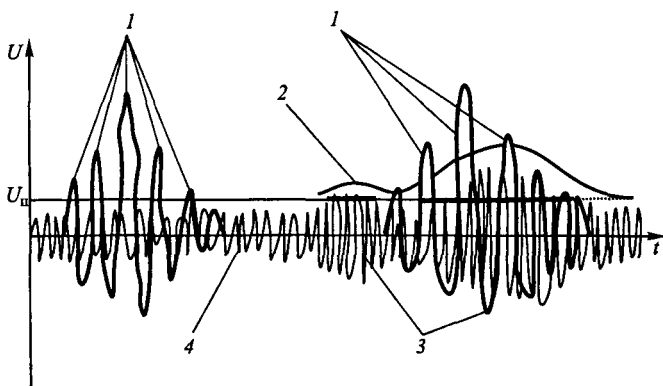


Рис.10.1. Общая схема регистрируемого сигнала АЭ на фоне шумов:
1 — осцилляции; 2 — плавающий порог; 3 — осцилляции без учета плавающего порога; 4 — шум

тивность АЭ контроля. Ввиду разнообразия причин, вызывающих их появление, шумы классифицируются в зависимости от:

- механизма генерации (источника происхождения) — акустические (механические) и электромагнитные;
- вида сигнала шумов — импульсные и непрерывные;
- расположения источника — внешние и внутренние.

Основными источниками шумов при АЭ контроле объектов являются:

- разбрызгивание жидкости в емкости, сосуде или трубопроводе при его наполнении;
- гидродинамические турбулентные явления при высокой скорости нагружения;
- трение в точках контакта объекта с опорами или подвеской, а также в соединениях, обладающих податливостью;
- работа насосов, моторов и других механических устройств;
- действие электромагнитных наводок;
- воздействие окружающей среды (дождя, ветра и пр.);
- собственные тепловые шумы преобразователя АЭ и шум входных каскадов усилителя (предусилителя).

Для подавления шумов и выделения полезного сигнала обычно применяют два метода: амплитудный и частотный. Амплитудный заключается в установлении фиксированного или плавающего уровня дискриминационного порога U_n , ниже которого сигналы АЭ аппаратура не регистрирует. Фиксированный порог устанавливается при наличии шумов постоянного уровня, плавающий — переменного. Плавающий порог U_n , устанавливаемый автоматически за счет отслеживания общего уровня шумов, позволяет, в отличие от фиксированного, исключить регистрацию части сигналов шума как сигнала АЭ.

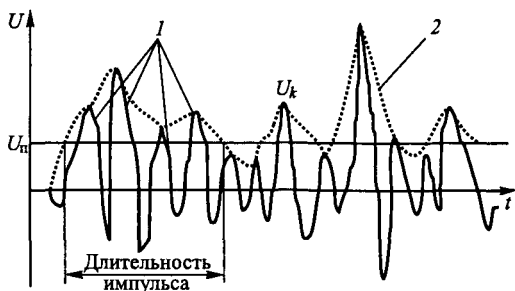


Рис.10.2. Общий вид сигнала АЭ на выходе усилительного тракта аппаратуры:

1 — осцилляции; 2 — огибающая; U_n — пороговое значение амплитуды;
 U_k — амплитуда k -го импульса

Частотный метод подавления шумов заключается в фильтрации сигнала, принимаемого приемниками АЭ, с помощью низко- и высокочастотных фильтров (ФНЧ/ФВЧ). В этом случае для настройки фильтров перед проведением контроля предварительно оценивают частоту и уровень соответствующих шумов.

После прохождения сигнала через фильтры и усилительный тракт, наряду с трансформацией волн на поверхности контролируемого изделия, происходит дальнейшее искажение первоначальных импульсов источника АЭ. Они приобретают двухполярный осциллирующий характер, изображенный на рис. 10.2 [7]. Дальнейший порядок обработки сигналов и использования их в качестве информативного параметра определяется компьютерными программами сбора данных и их постобработки, использованными в соответствующей аппаратуре различных производителей. Правильность определения числа событий и их амплитуда будут зависеть не только от возможности их регистрации (разрешающей способности аппаратуры), но и от способа регистрации.

Например, если регистрировать импульсы огибающей сигналов выше уровня U_n , то будет зафиксировано четыре импульса, а если регистрировать количество осцилляций выше этого же уровня, то будет зафиксировано девять импульсов. Под импульсом понимается цуг волн с частотой в рабочем диапазоне, огибающая которого в начале импульса пересекает порог вверх, а в конце импульса — вниз.

Таким образом, число зарегистрированных импульсов будет зависеть от настройки аппаратуры: величины тайм-аута конца события. Если тайм-аут будет достаточно велик, то может быть зарегистрировано, например, четыре импульса, если мал, то все осцилляции выше уровня U_n (восемь на рис. 10.2) могут быть зарегистрированы в качестве импульсов. Большие погрешности может внести также использование частотной полосы пропускания сигналов и уровня дискриминации, особенно когда сигналы АЭ по амплитуде сопоставимы с уровнем шумов.

10.3. Оценка результатов АЭ контроля

После обработки принятых сигналов результаты контроля представляют в виде идентифицированных (с целью исключения ложных дефектов) и классифицированных источников АЭ. Классификацию выполняют, используя следующие основные параметры АЭ сигналов:

- суммарный счет акустической эмиссии — число зарегистрированных импульсов АЭ выше установленного уровня дискриминации (порога) за интервал времени наблюдения;
- активность акустической эмиссии — число зарегистрированных импульсов АЭ за единицу времени;
- скорость счета акустической эмиссии — отношение суммарного счета акустической эмиссии к интервалу времени наблюдения;
- энергия акустической эмиссии — энергия, выделяемая источником АЭ и переносимая волнами, возникающими в материале;
- амплитуда сигналов акустической эмиссии, длительность импульса, время нарастания события АЭ.

Суммарный счет и активность АЭ во время пластической деформации пропорциональны объему деформированного материала. Амплитуда сигналов и энергии АЭ при развитии трещины прямо пропорциональна скорости ее роста и максимальным напряжениям в данной зоне.

При классификации источников АЭ учитывают также их концентрацию, параметры нагружения контролируемого объекта и время.

Выявленные и идентифицированные источники АЭ в соответствии с ПБ 03-593—03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов» рекомендуется разделять на четыре класса:

- первый — пассивный источник, регистрируемый для анализа динамики его развития;
- второй — активный источник, требующий дополнительного контроля с использованием других методов;
- третий — критически активный источник, требующий контроля за развитием ситуации и принятия мер по подготовке возможного сброса нагрузки;
- четвертый — катастрофически активный источник, требующий немедленного уменьшения нагрузки до нуля либо до величины, при которой активность источника снижается до уровня второго или третьего класса.

Учитывая большое число параметров, характеризующих АЭ, отнесение источников к соответствующему классу осуществляется с помощью ряда критериев, учитывающих набор параметров. Выбор критериев осуществляется по ПБ 03-593—03 в зависимости от механических и акустико-эмиссионных свойств материалов контролируемых объектов. К числу критериев относятся следующие:

- амплитудный, основанный на регистрации амплитуд импульсов (не менее трех от одного источника) и их сравнении с величиной

превышения порога (A_t), которая соответствует росту трещины в материале. Определение A_t требует исследования материала на образцах в предварительных экспериментах;

- интегральный, основанный на сравнении оценки активности источников АЭ F с относительной силой этих источников J_k в каждом интервале регистрации. При этом для определения J_k требуется установить в предварительных исследованиях значение коэффициента w ;

- локально-динамический, использующий изменение числа АЭ локационных событий на ступенях выдержки давления и динамику изменения энергии или квадрата амплитуды лоцированного события с ростом нагруженности объекта. Этот критерий используется для оценки состояния объектов, структура и свойства материала которых точно не известны. Данное обстоятельство делает этот критерий практически значимым, особенно при диагностике в полевых условиях;

- интегрально-динамический, производящий классификацию источника АЭ в зависимости от его типа и ранга. Тип источника определяют по динамике энерговыделения, исходя из амплитуды АЭ сигналов на интервале наблюдения. Ранг источника устанавливают путем расчета его коэффициента концентрации C и суммарной энергии E . Для расчета коэффициента концентрации необходимо определить R — средний радиус источника АЭ. Вместе с тем величина R акустико-эмиссионными приборами не определяется, что препятствует применению данного критерия на практике;

- критерии кода ASME, предназначенные для зонной локации и требующие знания допустимых значений параметров АЭ, что предполагает предварительное изучение свойств контролируемых материалов и учет объекта контроля как акустического канала.

Технология MONPAC предусматривает классификацию источников АЭ в соответствии со значением «Силовой индекс» и «Исторический индекс». Класс определяют по планарной диаграмме в зависимости от значения этих индексов. Данная классификация используется в технологии MONPAC с применением аппаратуры фирмы PAC (Physical Acoustics Corporation).

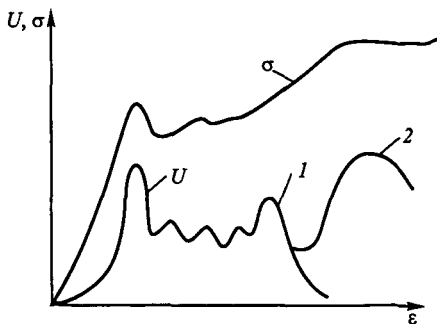
По критериям непрерывной АЭ, контролируемой обычно при течеискании, ситуация классифицируется следующим образом:

- класс 1 — отсутствие непрерывной АЭ;
- класс 4 — регистрация непрерывной АЭ.

Для возникновения эффекта АЭ необходимо высвобождение энергии. Закономерности излучения АЭ материала, вызываемые динамической локальной перестройкой его структуры, включая как пластическое деформирование, так и образование и рост трещин, исследуют при механическом растяжении соответствующих образцов.

Как правило, АЭ при пластической деформации является эмиссией непрерывного типа, имеющей вид непрерывного радиосигнала, сходного с шумовым. Для характеристики процесса АЭ часто ис-

Рис.10.3. Зависимость эффективного значения АЭ (U) при растяжении гладких образцов, совмещенная с диаграммой напряжения (σ) — деформации (ϵ)



пользуется значение акустической эмиссии U — параметр, учитывающий как количество импульсов, так и их амплитуду, пропорциональный произведению активности или скорости счета на среднее значение амплитуды сигналов за единицу времени. Для большинства металлов при их пластическом деформировании максимум активности, скорости счета и эффективного значения АЭ совпадает с пределом текучести.

На рис. 10.3 приведена зависимость эффективного значения АЭ (U) при растяжении гладких образцов, совмещенная с диаграммой напряжения (σ)—деформации (ϵ) [2]. Зависимость 1 соответствует железу-армко и малоуглеродистой стали (с содержанием углерода до 0,015 %) и представляет собой непрерывную АЭ с максимумом в зоне зуба (площадки) текучести. Зависимость 2 характерна для конструкционной углеродистой стали, содержащей карбиды, и кроме непрерывной АЭ включает отдельные импульсы большой амплитуды, связанные с разрушением цементитовых пластинок в перлите стали.

Максимум активности АЭ в зоне зуба и площадки текучести объясняется массовым образованием и перемещением дефектов (дислокаций) кристаллической решетки при переходе к пластической деформации и накоплении необратимых изменений структуры. Затем активность снижается из-за того, что движение вновь образующихся дислокаций ограничивается уже существующими. При повторном нагружении проявляется эффект «необратимости», называемый *эффектом Кайзера*. Он заключается в том, что при повторном нагружении через малый промежуток времени на фиксированном уровне чувствительности аппаратуры АЭ не регистрируется до тех пор, пока не будет превышен достигнутый перед этим уровень нагрузки. На самом деле сигналы АЭ возникают с самого начала нагружения, но их величина настолько мала, что находится ниже уровня чувствительности аппаратуры. Вместе с тем при повторном нагружении спустя длительное время АЭ регистрируется на уровне нагрузки, меньшем, чем предварительно достигнутый. Этот эффект, называемый *эффектом Феличиты*, объясняется обратным движением дислокаций при снятии нагрузки.

Наибольшую опасность представляют трещиноподобные дефекты, развитие которых в большинстве случаев приводит к авариям и разрушениям конструкции. Образование и рост трещины происходят скачкообразно и сопровождаются различными раздельными импульсами соответствующей амплитуды. В материалах как с естественными трещинами, так и с искусственными надрезами происходит концентрация напряжений в вершине дефекта при нагружении объекта рабочими или испытательными нагрузками. При достижении локальным напряжением предела текучести материала образуется зона пластической деформации. Объем этой зоны пропорционален уровню напряжений, которые характеризуются коэффициентом интенсивности этих напряжений K . Когда локальные напряжения превышают предел прочности, происходит микроразрыв — скачкообразное приращение длины дефекта, сопровождающееся импульсом АЭ. Число импульсов N растет с увеличением K . Зависимость суммарной АЭ N от коэффициента интенсивности напряжений K имеет вид

$$N = cK^m,$$

где c — коэффициент условий испытаний; m — параметр, связанный со свойствами материалов и скоростью развития разрушения (трещины).

Амплитуда сигналов АЭ при росте трещины может достигать 85 дБ и более. Для пластической деформации амплитуда сигналов АЭ обычно не превышает 40...50 дБ. Таким образом, различие амплитуд АЭ является одним из основных признаков отличия пластической деформации от роста трещины.

Результаты АЭ контроля представляют в виде перечня зарегистрированных источников АЭ, отнесенных к тому или иному классу с помощью принятого критерия. Местонахождение источника указывают на развертке поверхности контролируемого объекта (рис. 10.4). Оценку состояния контролируемого объекта в свою очередь проводят по наличию в нем источников АЭ того или иного класса.

При положительной оценке технического состояния объекта по результатам АЭ контроля или отсутствию зарегистрированных источников АЭ применение дополнительных видов контроля не требуется. При обнаружении источников АЭ второго, третьего классов используют дополнительные виды неразрушающего контроля с целью оценки допустимости выявленных источников АЭ.

10.4. Аппаратура АЭ контроля

Структура аппаратуры АЭ контроля определяется следующими основными задачами: прием и идентификация сигналов АЭ, их усиление и обработка, определение значений параметров сигналов, фиксация результатов и выдача информации. Аппаратура различает

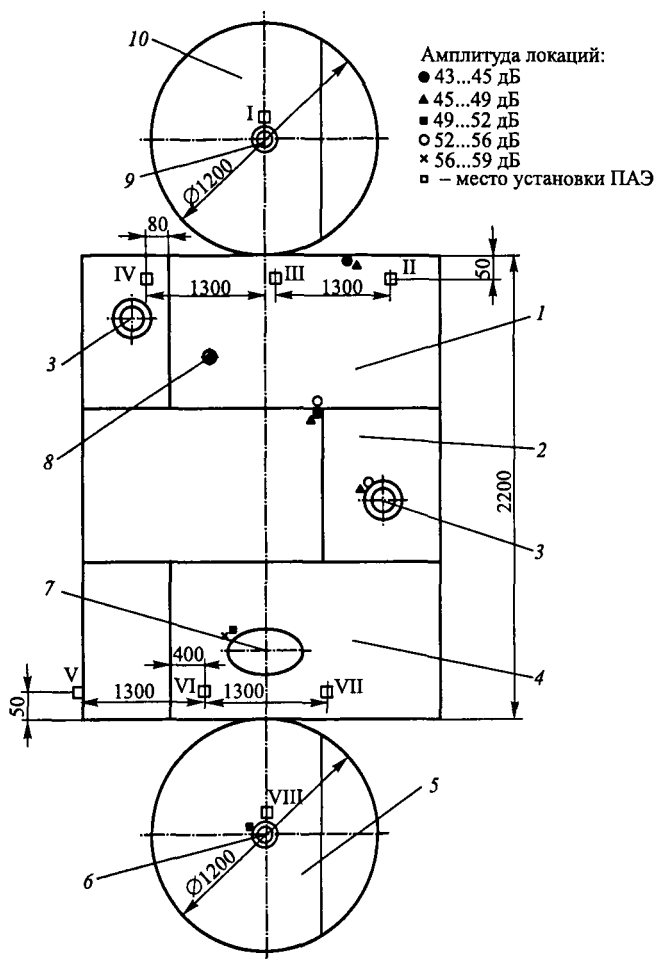


Рис. 10.4. Схема расположения источников АЭ на развертке сосуда и местоположение зарегистрированных дефектов:

1 — обечайка 1; 2 — обечайка 2; 3 — вход воздуха; 4 — обечайка 3; 5 — днище нижнее; 6 — штуцер слива конденсатора; 7 — лазовое отверстие; 8 — штуцер манометра; 9 — штуцер предохранительного клапана; 10 — днище верхнее; I—VIII — номера приемников АЭ

ся степенью сложности, назначением, транспортабельностью, а также классом в зависимости от объема получаемой информации. Наибольшее распространение нашла многоканальная аппаратура, позволяющая наряду с параметрами АЭ определять координаты источников сигналов с одновременной регистрацией параметров испытаний (нагрузка, давление, температура и пр.). Функциональная схема такой аппаратуры приведена на рис. 10.5.

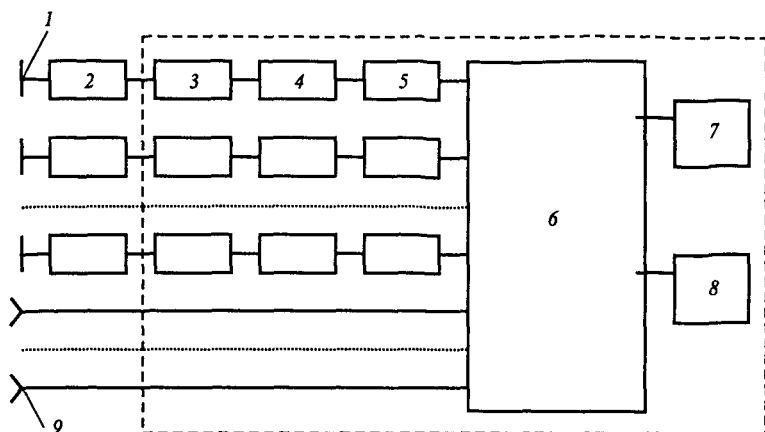


Рис. 10.5. Функциональная схема аппаратуры АЭ контроля

В состав аппаратуры входят соединенные кабельными линиями следующие основные элементы: 1 — преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ); 2 — предварительные усилители; 3 — частотные фильтры; 4 — основные усилители; 5 — блоки обработки сигналов; 6 — основной процессор обработки, хранения и представления результатов контроля; 7 — пульт управления (клавиатура); 8 — видеомонитор; 9 — датчики и кабельные линии параметрических каналов.

Элементы аппаратуры 3 — 8, как правило, конструктивно выполняются в виде одного блока (показано на рис.10.5 пунктиром) на базе портативного компьютера.

Преобразователь акустической эмиссии служит для преобразования упругих акустических колебаний в электрические сигналы и является важнейшим элементом аппаратного комплекса АЭ контроля. Наибольшее распространение нашли пьезоэлектрические ПАЭ, схема которых мало отличается от пьезопреобразователей (ПЭП), используемых при проведении ультразвукового контроля.

По конструкции различают следующие виды ПАЭ:

- однополюсный и дифференциальный;
- резонансный, широкополосный или полосовой;
- совмещенный с предусилителем или несовмещенный.

По уровню чувствительности ПАЭ разделяются на четыре класса (1—4-й), по частотным диапазонам — на низкочастотные (до 50 кГц), стандартные промышленные (50...200 кГц), специальные промышленные (200...500 кГц) и высокочастотные (более 500 кГц). Затухание упругих колебаний снижается с уменьшением их частоты, поэтому низкочастотные ПАЭ используют прежде всего при контроле протяженных объектов, например трубопроводов и объектов с высоким затуханием колебаний.

Специальные ПАЭ применяют для контроля малых объектов с длиной до 1 м, высокочастотные — при проведении лабораторных исследований.

В зависимости от амплитудно-частотной характеристики различают ПАЭ резонансные (полоса пропускания $0,2 F_p$, где F_p — рабочая частота ПАЭ), полосовые (полоса пропускания $0,2...0,8 F_p$) и широкополосные (полоса пропускания более $0,8 F_p$).

Основное отличие ПАЭ от прямых ПЭП заключается в особенностях демпфирования, необходимого для гашения свободных собственных колебаний пьезопластины, а также в толщине самой пьезопластины. Тыльная сторона пьезопластины ПАЭ может оставаться свободной или частично или полностью задемпфированной.

Одной из основных характеристик ПАЭ является коэффициент преобразования k , определяемый из выражения

$$k = \frac{U_{\max}}{S},$$

где $U_{\max}$ — максимальное электрическое напряжение на пьезопластине, В; S — максимальное упругое смещение частиц контролируемого объекта непосредственно под ПАЭ, м.

Коэффициент преобразования имеет размерность В/м и определяет чувствительность ПАЭ. Максимальное значение k имеет место у узкополосных резонансных ПАЭ, тыльная сторона пьезопластин которых не задемпфирована. Механическое демпфирование приводит к выравниванию чувствительности ПАЭ в более широком диапазоне, однако абсолютная чувствительность (коэффициент преобразования k) при этом значительно снижается.

Закрепление ПАЭ на поверхности объекта контроля осуществляется различными способами: с помощью клея, хомутов, струбцинами, магнитными держателями, с помощью стационарно установленных кронштейнов и т. п. В практике промышленного АЭ контроля используют в основном резонансные ПАЭ, так как чувствительность у них намного выше. Конструкция одного из таких преобразователей приведена на рис. 10.6.

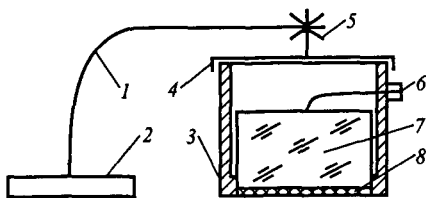


Рис. 10.6. Схема резонансного ПАЭ конструкции ЗАО «Элтест»:

1 — пластинчатая пружина; 2 — постоянный магнит магнитного держателя; 3 — корпус; 4 — прижимной колпачок; 5 — самоустанавливающийся сферический кронштейн; 6 — разъем электрический; 7 — пьезоэлемент; 8 — протектор керамический

Крепление ПАЭ осуществляется с помощью магнитного прижима. Для обеспечения максимальной чувствительности тыльная сторона пластины выполнена свободной, а боковая поверхность задемпфирована лишь на 30 % компаундом.

Преобразователь акустической эмиссии соединяется коротким (длиной не более 30 см) кабелем с предварительным усилителем (см. рис. 10.5). Наряду с усилением (обычно до 40 дБ) предусилитель улучшает соотношение сигнал—шум при передаче сигнала по кабельной линии к блоку основной аппаратуры (3 — 8), удаленной на расстояние до 150...200 м.

Фильтром устанавливают спектр пропускания частот. Фильтр настраивается таким образом, чтобы по возможности максимально отсечь шумы различных частот.

Основной усилитель предназначен для усиления ослабленного после прохождения по кабельной линии сигнала. Он обладает равномерной амплитудно-частотной характеристикой при коэффициенте усиления 60...80 дБ.

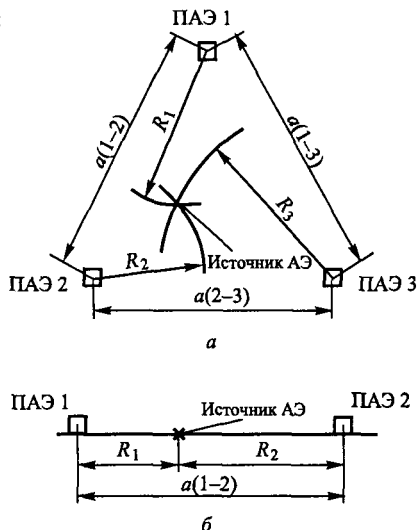
Для подавления электромагнитных помех весь канал, включая ПАЭ, предусилитель, основной блок и соединительные кабельные линии, экранируют. Часто используют также дифференциальный способ подавления электромагнитных помех, основанный на том, что пьезопластинку ПАЭ разрезают на две части и одну половинку переворачивают, меняя таким образом ее поляризацию. Далее сигналы от каждой половинки усиливают отдельно, изменяют фазу сигналов на одной из половинок на π и складывают оба сигнала. В результате электромагнитные помехи оказываются в противофазе и подавляются.

Блок обработки сигналов фиксирует время их прихода, регистрирует сигналы выше установленного уровня дискриминации, преобразует сигналы в цифровую форму и осуществляет их хранение. Окончательная обработка АЭ сигналов, зафиксированная по разным каналам, осуществляется с помощью основного процессора, в котором также осуществляется определение местоположения (локация) источника сигналов АЭ. При контроле линейного объекта (например, трубопровода) достаточно иметь два ПАЭ; для планарных объектов, имеющих сопоставимые габаритные размеры и большую площадь поверхности, — не менее трех ПАЭ, окружающих источник.

Сигналы от источника АЭ типа трещины характеризуются тем, что их испускает один источник, они кратковременны, а время их поступления на ПАЭ отражает расстояние до трещины. Положение источника АЭ на плоскости находят методами триангуляции. По скорости распространения волны в материале и разности времен прихода сигнала на разные ПАЭ рассчитывают местоположение множества точек для источника АЭ, которые будут находиться на окружностях радиусами R_1 , R_2 и R_3 от соответствующих ПАЭ (рис. 10.7, а). Единственно истинное положение источника АЭ определяется путем решения треугольников, у которых известны все три

Рис. 10.7. Схемы локации источников АЭ:

a — планарная (на плоскости);
б — линейная



стороны. Для этого координаты ПАЭ на изделии фиксируются с максимально возможной точностью и вводятся перед проведением контроля в блок 6 на развертке поверхности (см. рис. 10.5).

Схема линейной локации приведена на рис. 10.7, б. Если источник АЭ расположен не посередине между ПАЭ, то сигнал на дальней ПАЭ придет позже, чем на ближний. Зафиксировав расстояние $a(1-2)$ между ПАЭ и разницу времени Δt времени прихода сигнала, рассчитывают координаты расположения дефекта по формулам

$$R_1 = (a(1-2) - \Delta t C)/2;$$

$$R_2 = (a(1-2) + \Delta t C)/2,$$

где C — скорость распространения волны в объекте.

Метод АЭ позволяет контролировать всю поверхность объекта контроля. Для проведения контроля должен быть обеспечен непосредственный доступ к участкам поверхности объекта контроля для установки ПАЭ. При отсутствии такой возможности, например при проведении периодического или постоянного контроля подземных магистральных трубопроводов без освобождения их от грунта и изоляции, могут быть использованы волноводы, укрепленные постоянно на контролируемом объекте.

Точность локации должна быть не меньше величины, равной двум толщинам стенки или 5 % расстояния между ПАЭ в зависимости от того, какая величина больше. Погрешности вычисления координат определяются погрешностями измерения времени поступления

ния сигнала на преобразователи. Источниками погрешностей являются:

- погрешность измерения временных интервалов;
- отличие реальных путей распространения от теоретически принятых;
- наличие анизотропии скорости распространения сигналов;
- изменение формы сигнала в результате распространения по конструкции;
- наложение по времени сигналов, а также действие нескольких источников;
- регистрация преобразователями волн различных типов;
- погрешность измерения (задания) скорости звука;
- погрешность задания координат ПАЭ и использование волноводов.

До нагружения объекта проверяют работоспособность аппаратуры и оценивают погрешность определения координат с помощью имитатора. Его устанавливают в выбранной точке объекта и сравнивают показания системы определения координат с реальными координатами имитатора. В качестве имитатора используют пьезоэлектрический преобразователь, возбуждаемый электрическими импульсами от генератора. С этой же целью может быть использован так называемый источник Су-Нильсена (излом графитового стержня диаметром 0,3...0,5 мм, твердостью 2Т (2Н)).

Визуализация расположения источников АЭ осуществляется с помощью видеомонитора, на котором источники изображаются в соответствующем месте на развертке контролируемого объекта (см. рис. 10.4) в виде светящихся точек различной яркости, цвета или формы (зависит от использованного программного обеспечения). Документирование результатов контроля осуществляется с помощью соответствующих периферийных устройств, подключаемых к основному процессору.

Рассмотренный выше метод определения местоположения источников АЭ, основанный на измерении разности времени прихода сигналов, может быть использован только для дискретной АЭ. В случае непрерывной АЭ определить время задержки сигналов становится невозможно. В этом случае координаты источника АЭ можно определить, используя так называемый амплитудный метод, основанный на измерении амплитуды сигнала разными ПАЭ. В практике диагностирования этот метод применяют для обнаружения течей через сквозные отверстия контролируемого изделия. Он заключается в построении столбчатой гистограммы амплитуды сигнала источника, принимаемого различными ПАЭ (рис. 10.8). Анализ такой гистограммы позволяет выявить зону расположения течи. Удобен при диагностировании таких линейных объектов, как нефте- и газопроводы.

Системы диагностического мониторинга, базирующиеся на методе АЭ контроля, являются наиболее универсальными. Аппаратное решение такой системы обычно включает:

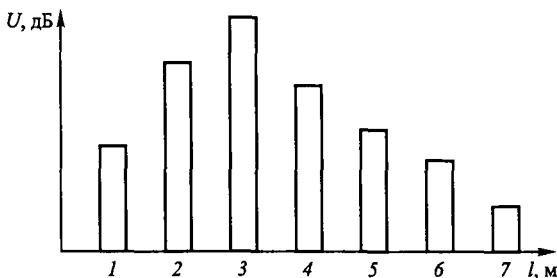


Рис. 10.8. Иллюстрация амплитудного метода определения источников АЭ:
1—7 — номера приемников АЭ

- типовые блоки акустико-эмиссионной аппаратуры;
- блоки согласования и коммутации всех видов первичных преобразователей дополнительных видов неразрушающего контроля, состав которых определяется видом контролируемого объекта;
- блоки управления и принятия решения по результатам диагностической информации о текущем состоянии контролируемого объекта.

10.5. Порядок проведения и область применения АЭ контроля

На каждый объект разрабатывается соответствующая технология контроля. Работы по АЭ контролю начинаются с установки ПАЭ на объект. Установка осуществляется непосредственно на зачищенную поверхность объекта либо должен быть использован соответствующий волновод. Для осуществления локаций источников АЭ на объемном объекте, имеющем большую площадь поверхности, ПАЭ размещаются в виде групп (антенн), в каждой из которых используется не менее трех преобразователей. На линейном объекте в каждой группе используют по два ПАЭ. Размещение ПАЭ и количество антенных групп определяется конфигурацией объекта и оптимальным размещением ПАЭ, связанным с затуханием сигнала и точностью определения координат источника АЭ.

В зависимости от конфигурации объект делят на отдельные элементарные участки: линейные, плоские, цилиндрические, сферические. Для каждого участка выбирают соответствующую схему расположения преобразователей. Расстояние между ПАЭ выбирают таким образом, чтобы сигнал имитатора АЭ (излом графического стержня), расположенного в любом месте контролируемой зоны, обнаруживался тем минимальным количеством преобразователей, которое требуется для расчета координат.

Размещение ПАЭ должно, как правило, обеспечивать контроль всей поверхности объекта. Однако в ряде случаев, особенно при контроле крупногабаритных объектов, допускается размещение ПАЭ только в тех зонах объекта, которые считаются наиболее важными.

После установки ПАЭ на контролируемый объект выполняют проверку работоспособности АЭ системы с помощью имитатора АЭ, расположенного на определенном расстоянии от каждого ПАЭ. Отклонение зарегистрированной амплитуды сигнала АЭ не должно превышать ± 3 дБ средней величины для всех каналов. Коэффициент усиления каналов и порог амплитудной дискриминации выбирают с учетом ожидаемого диапазона амплитуд сигналов АЭ. Выполняют и другие проверки, предусмотренные технологией контроля данного объекта.

АЭ контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ. Для этого после выполнения подготовительных и настроечных работ объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его работы, характером испытаний и приводится в технологии АЭ контроля конкретного объекта.

В ПБ 03-593-03 предусмотрено выполнение АЭ контроля в процессе нагружения объекта внутренним давлением до определенной, заранее выбранной величины и в процессе выдержки давления на определенных уровнях. Максимальное значение внутреннего давления $P_{\text{исп}}$ должно превышать разрешенное рабочее (эксплуатационное) давление $P_{\text{раб}}$ не менее чем на 5...10 %, но не превышать пробного давления $P_{\text{пр}}$, определяемого по формуле

$$P_{\text{пр}} = aP \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t},$$

где P — расчетное (паспортное) давление объекта, МПа; $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]_t$ — допускаемое напряжение для материала объекта или его элементов соответственно при 20 °С и расчетной температуре t , МПа; a — повышающий коэффициент: $a = 1,25$ для всех объектов, кроме литых сосудов, $a = 1,5$ для литых сосудов.

Время выдержки при максимальном давлении зависит от толщины и типа стенки (из прокатных листов, литая или многослойная) и составляет 5...60 мин.

При АЭ контроле резервуаров для хранения нефти, нефтепродуктов и других жидкостей используют максимальную величину нагрузки $P_{\text{исп}} = 1,05 P_{\text{раб}}$. Время их выдержки при максимально допустимом уровне заполнения должно быть не менее 2 ч. Нагружение осуществляется с использованием специального оборудования, обеспечивающего повышение внутреннего (внешнего) давления по за-

данному графику, определяющему скорость нагружения, время выдержек объекта под нагрузкой и значения нагрузок.

Испытания объекта подразделяют на предварительные и рабочие.

Предварительные испытания имеют целью проверку работоспособности всей аппаратуры; уточнение уровня шумов и корректировку порога аппаратуры; опрессовку заглушек и сальниковых уплотнений; выявление источников акустического излучения, связанных с трением в точках подвески (крепления) объектов, опор, конструктивных элементов жесткости и пр. Предварительные испытания проводят при циклическом нагружении в диапазоне $0 \dots 0,25P_{\text{раб}}$. Для объектов без плакирующих покрытий и ребер жесткости число циклов нагружения составляет не менее 2, для прочих — не менее 5.

Рекомендуется нагружение при рабочем испытании проводить ступенями, с выдержками давления на уровне $0,5P_{\text{раб}}$; $0,75P_{\text{раб}}$; $P_{\text{раб}}$ и $P_{\text{исп}}$. Время выдержки на промежуточных ступенях должно составлять не менее 10 мин. Пример типового графика нагружения приведен на рис. 10.9.

Нагружение объектов должно производиться плавно со скоростью, при которой не возникают интенсивные помехи. Время подъема давления может быть весьма большим (достигать десятков часов) для крупных объектов. Скорость подъема давления обычно составляет $0,1 \text{ МПа/мин}$. Максимальная скорость повышения давления для объектов малого объема не должна превышать $(1/60 \dots 1/20)P_{\text{исп}}$. Полностью исключить влияние шумов, возникающих при работе насоса, создающего давление, позволяет регистрация сигналов АЭ при фиксированной нагрузке на каждой ступени нагружения.

АЭ контроль резервуаров большого объема и хранилищ проводят в режиме мониторинга (непрерывного контроля) либо по специальной программе. В качестве нагружающей среды могут быть использованы вода, масло, рабочее тело объекта в виде жидких сред (гид-

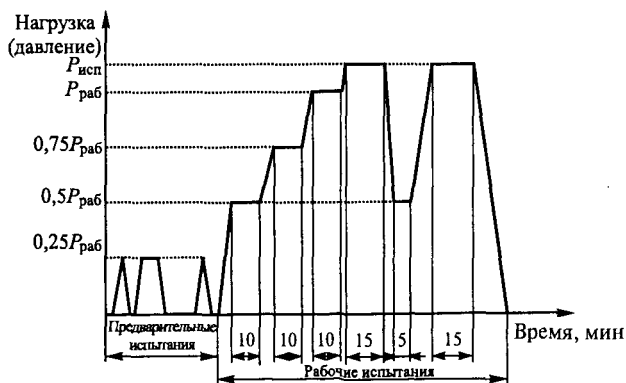


Рис. 10.9. Типовой график нагружения

равлические испытания), а также газообразные среды (пневмоиспытания). В случае проведения гидравлических испытаний подача нагружающей жидкости должна производиться через патрубок, расположенный в нижней части сосуда, ниже уровня жидкости, заполняющей сосуд. Сигналы АЭ при гидронагрузении затухают значительно быстрее, чем при нагружении газом (воздухом). Это связано с тем, что жидкостью поглощается значительно большая часть энергии колебаний по сравнению с газом. В связи с этим при гидронагрузении расстояния между смежными преобразователями акустической эмиссии должны быть уменьшены.

Выявленные в процессе испытаний источники АЭ в зависимости от степени их опасности разделяют на классы в соответствии с системой классификации и критериев оценки, приведенных в технологии контроля. Результаты контроля выводятся на периферийные устройства для их документирования. При положительной оценке технического состояния объекта по результатам АЭ контроля или отсутствии зарегистрированных источников АЭ применение дополнительных видов контроля не требуется. Если интерпретация результатов АЭ неопределенна, рекомендуется использовать дополнительные виды неразрушающего контроля.

Наблюдение и контроль следует осуществлять на всех этапах испытаний. Некоторые виды дефектов проявляют себя в период сброса давления. Так, при снижении давления возникают сигналы от трения берегов трещин при их смыкании. Такие дефекты, как отдулины, возникающие чаще всего при наводороживании металла и проявляющиеся в расслоении металла по толщине, также обнаруживаются на этапе сброса давления (отдулины хорошо обнаруживаются визуально при косом освещении, иногда ощущаются при нажатии рукой). Для подтверждения их наличия обычно применяют методы УЗК.

В процессе нагружения рекомендуется непрерывно наблюдать на экране монитора обзорную картину АЭ излучения испытываемого объекта. Испытания прекращаются досрочно в случаях, когда регистрируемый источник АЭ относится к четвертому классу. Объект должен быть разгружен, испытание либо прекращено, либо выяснен источник АЭ и оценена безопасность продолжения испытаний. Быстрое (экспоненциальное) нарастание суммарного счета, амплитуды импульсов, энергии или MARSE может служить показателем ускоренного роста трещины, приводящего к разрушению.

Характерными особенностями метода АЭ контроля, определяющими его возможности и область применения, являются следующие:

- метод АЭ контроля обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности. При этом большие по размерам дефекты могут попасть в класс неопасных, что значительно снижает потери из-за перебраковки. Одновременно при развитии опасного растущего дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличиваются, что приводит к значительному воз-

растанию вероятности обнаружения такого источника АЭ и повышает надежность эксплуатируемого оборудования;

- чувствительность метода АЭ контроля весьма высока. Он позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей миллиметра, что значительно превышает чувствительность других методов. Положение и ориентация объекта не влияют на выявляемость дефектов;

- свойство интегральности метода АЭ контроля обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;

- метод АЭ контроля обеспечивает возможность проведения контроля объектов без удаления их гидро- или теплоизоляции. Для проведения контроля достаточно вскрыть изоляцию только в местах установки преобразователей, что многократно снижает объем восстановительных работ;

- метод обеспечивает возможность проведения дистанционного контроля недоступных объектов, таких, как подземные и подводные трубопроводы, аппараты закрытых конструкций и т.п.;

- метод позволяет проводить контроль различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материалов и имеет меньше ограничений, связанных с их свойствами и структурой;

- при контроле промышленных объектов метод во многих случаях обладает максимальным значением отношения эффективность/стоимость.

Метод АЭ контроля может быть использован не только для технической диагностики и периодических технических освидетельствований объектов в процессе эксплуатации, но и для контроля ответственных объектов при их изготовлении и в процессе приемочных испытаний. АЭ метод может быть использован также для оценки скорости развития дефекта и, соответственно, оценки остаточного ресурса контролируемого объекта. Регистрация АЭ позволяет определить образование свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках и фланцевых соединениях.

Существенным недостатком метода является сложность выделения полезного сигнала из помех, когда дефект мал. Вероятность выявления сигнала АЭ высока только при резком развитии дефекта, поэтому метод АЭ контроля рекомендуется применять в сочетании с другими методами неразрушающего контроля. Другим существенным недостатком метода наряду с высокой стоимостью аппаратуры является необходимость высокой квалификации оператора АЭ контроля.

Метод АЭ контроля в соответствии с правилами Ростехнадзора должен применяться при пневмоиспытаниях сосудов, работающих под давлением, в качестве сопровождающего метода, повышающего безопасность проведения испытаний и предупреждения возможных разрушений сосуда.

11. ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ

11.1. Деградационные процессы, виды предельных состояний

При эксплуатации технологического оборудования в той или иной мере, в зависимости от условий и режимов работы, происходит деградация конструкционных материалов. **Деградация** — явление, наблюдающееся в материалах с течением длительного времени и выражающееся в соответствующем снижении способности конструкции сопротивляться воздействию на нее различных нагрузок и, соответственно, снижающее остаточный ресурс оборудования.

Диагностирование технического состояния оборудования и прогноз его изменения при дальнейшей эксплуатации осуществляется на основе анализа деградационных процессов и выявления определяющих параметров технического состояния. Определяющие параметры технического состояния (ПТС) — это параметры, изменение которых в отдельности или в некоторой совокупности приводит оборудование в неработоспособное состояние.

В нефте- и газодобывающей и перерабатывающей промышленности выделяют следующие деградационные процессы, приводящие к потере работоспособности технологического оборудования:

- изменение геометрии конструкции или отдельных ее элементов;

- поверхностное изнашивание или коррозионное повреждение;
- образование и развитие макродефектности;
- деградация (старение) механических свойств материалов.

В зависимости от действующего механизма деградационного процесса различают следующие виды предельных состояний:

- вязкое, усталостное или кратковременное хрупкое разрушение элемента или всей конструкции;

- предельная пластическая деформация металлоконструкции, обусловленная прогибом или нарушением устойчивости несущих элементов, образованием «пластических шарниров» или явлениями ползучести, определяющая необходимость прекращения ее эксплуатации;

- разгерметизация или течь конструкции.

Определяющими параметрами, приводящими к перечисленным видам предельных состояний, являются напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, механические свойства конструкционных материалов, степень поражения коррозией, количество и размеры повреждений и дефектов.

11.2. Характеристики деградационных процессов

Рассмотрим основные характеристики и особенности деградационных процессов в порядке, перечисленном выше.

Процессы изменения геометрии охватывают широкий круг явлений и могут иметь как локальный, так и общий характер, касающийся конструкции в целом. К их числу относят: отклонения от начальной (исходной) формы технологического оборудования (отклонения от прямолинейности, плоскостности, вертикальности, цилиндричности и др.), образование гофр, отдулины, расслоения и т. д. Их причинами наряду с природными явлениями (например, пучение грунта при промерзании, оползни и др.) и эксплуатационными нагрузками является и деградация материалов.

Роль материалов в указанном выше перечне явлений может быть различной [12]. Так, при формировании отдулин и расслоений существенно влияние химического состава и структуры сталей. Наибольшую склонность к образованию отдулин обнаруживают в сосудах и аппаратах давления, эксплуатируемых в контакте с водородсодержащей средой (особенно при наличии сероводорода) и выполненных из кремнемарганцовистых (16ГС, 09Г2С) и марганцовистых (09Г2, 14Г2) сталей.

Наличие в этих сталях раскатанных при прокатке пластичных сульфидов и оксисульфидов способствует скоплению водорода на границах раздела ферритная матрица—включение. Дальнейшее накопление водорода в стали сопровождается его молекуляризацией в пустотах (порах). Водород из атомарного состояния переходит в молекулярное, вызывая повышение давления на границе раздела феррит—включение. Отмечено повышение давления водорода в указанных выше ловушках до 70 и даже до 150 атм, что в ряде случаев существенно превышает рабочее давление в аппаратах.

Изнашивание — это процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы тела (ГОСТ 22674—88. «Обеспечение износостойкости изделий»). Интенсивность изнашивания определяют в единицах объема, массы, длины и др. Износостойкость оценивается величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.

Изнашивание по характеру воздействия на поверхность трения принято подразделять на следующие виды:

- механическое изнашивание, к которому относятся абразивное (включая гидро- или газоабразивное), эрозионное (в том числе гидро- или газозерозионное), кавитационное, усталостное, изнашивание при фреттинге, изнашивание при заедании;
- коррозионно-механическое: окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии, водородное, электроэрозионное.

Классическая диаграмма изменения скорости износа по времени включает три участка (см. рис. 1. 2): участок приработки деталей,

характеризуемый большой скоростью износа; участок установившегося износа (износ с относительно стабильной скоростью); участок катастрофического износа вплоть до предельного состояния.

Для оценки износа используют различные методы в зависимости от вида оборудования: прямое измерение с помощью различных мерительных инструментов; толщинометрию с помощью ультразвуковых или иных толщиномеров; контроль содержания металла в смазочном материале и др. Все большее применение находит метод поверхностной или тонкослойной активации, основанный на локальном облучении изнашиваемой поверхности изделия и измерении интенсивности излучения образованной радионуклидной метки. Изменение интенсивности излучения при эксплуатации изделия переводится в характеристики износа по градуировочному графику. Контроль осуществляется дистанционно и позволяет оценивать износ от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров с точностью 5...15 %. Данный метод применяют как для контроля машинного оборудования, так и для емкостного (сосуды, резервуары, трубопроводы и др.).

Коррозийная стойкость конструкционного материала — одна из важнейших, а зачастую и самая важная характеристика, определяющая надежность и срок службы технологического оборудования.

Коррозия (от лат. *corrodere* — пожирать, изглаживать) — это процесс разрушения металлических материалов в результате их физико-химического взаимодействия с компонентами окружающей среды. *Коррозия* — это процесс, посредством которого сплавы железа возвращаются в более стабильную химическую форму, характерную для окиси; процесс, прямо противоположный металлургическим процессам, не нуждающийся в каких-либо энергетических затратах.

Коррозия является сложным процессом, зависящим от многих факторов и от их конкретного сочетания. Учитывая это многообразие, коррозию классифицируют по следующим признакам:

- по механизму протекания коррозионного процесса — химическая (в газовой или жидкостной среде, не проводящей электрический ток) и электрохимическая (в среде электролита). В большинстве случаев коррозионное поведение металлов является частным случаем их электрохимического поведения;

- по типу агрессивных сред, в которых протекает коррозия — коррозия в газовой или жидкостной среде, особенно при высоких температурах; биокоррозия под воздействием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов; коррозия в почве под действием растворов солей, содержащихся в грунте; коррозия блуждающим током; коррозия, обусловленная воздействием атмосферных осадков с поверхностью металла. При контакте двух металлов различной активности с электролитом образуется гальваническая пара. Электроны переходят от более активного металла к менее активному, при этом более активный металл разрушается;

- по условиям протекания коррозионного процесса — контактно-электрохимическая коррозия, вызванная контактом металлов, имею-

щих разные стационарные потенциалы в данном электролите; контактная (в зоне контакта разнородных металлов в среде электролита); шелевая, протекающая на участках поверхности возле конструкционных или технологических зазоров между двумя металлами, а также в местах неплотного контакта металла с неметаллическим коррозионно-инертным материалом; избирательная (компонентно-избирательная и структурно-избирательная), связанная с повышенной коррозионной активностью одного из компонентов сплава; коррозионно-эрозионная (фреттинг-коррозия), обусловленная одновременным воздействием коррозионной среды и микроскопических смещений сдвига в результате вибрации в местах контакта плотно сжатых или катящихся одна по другой деталей; коррозионная кавитация, являющаяся результатом коррозионного и одновременно ударного воздействия из-за образования кавитационных полостей в жидкости; коррозия под напряжением (стресс-коррозия), сопровождающаяся растрескиванием металла в результате одновременного воздействия растягивающих напряжений и агрессивной среды. Необходимым условием коррозионного растрескивания является наличие специфических компонентов в составе коррозионной среды. Для сплавов на основе меди таким компонентом является аммиак, для нержавеющей сталей — хлориды и щелочи, в то время как в растворах серной, азотной и уксусной кислоты, а также в чистой воде они не подвержены этому виду разрушения.

Следует иметь в виду, что при коррозии под напряжением растрескивание может произойти и в результате наводороживания. Этот вид разрушения называется водородным растрескиванием (из-за давления до 70...150 атм в зонах скопления водородомолизации, а также из-за облегчения роста трещин в результате снижения пластичности наводороженного металла перед ее вершиной).

Коррозионная усталость также относится к типу коррозионного растрескивания под напряжением. Однако в этом случае напряжения не статические, а переменные. Коррозионно-усталостное разрушение начинается при одновременном воздействии на металл циклических напряжений и коррозионных повреждений в виде язв, каверн и межкристаллитной коррозии. Эти повреждения являются очагами зарождения многочисленных трещин, разветвляющихся по мере роста и заканчивающихся пучками (напоминающими корневую систему растений), ориентированными в разные стороны. Коррозионно-усталостное повреждение металла проявляется понижением предела его выносливости, который при этом непрерывно понижается с увеличением числа циклов нагружений. Другими словами, четко выраженный горизонтальный участок, соответствующий пределу неограниченной выносливости, на кривой усталости металла с коррозионно-усталостными трещинами отсутствует.

По характеру коррозионного разрушения на поверхности или в объеме металла коррозию разделяют на сплошную, равномерную по всей поверхности или неравномерную на различных участках и местную.

Местную коррозию подразделяют на следующие виды:

- пятнами, диаметр которых больше глубины прокорродировавшего слоя металла;
- язвенная, в виде каверн, диаметр которых соизмерим с их глубиной;
- питтинговая или точечная в виде множества отдельных точек диаметром 0,1...2 мм значительной глубины;
- межкристаллитная, характеризующая избирательным растворением металла по границам зерен;
- ножевая (является разновидностью межкристаллитной), разрезающая металл словно ножом вдоль шва в зоне термического влияния сварки и возникающая при использовании некоторых сплавов в особо агрессивных условиях;
- подповерхностная, начинающаяся от точечных поражений и распространяющаяся в стороны под очень тонким, например наклепанным, слоем металла, который затем вздувается пузырями или шелушится;
- ручейковая в виде узкой полоски на внутренней поверхности нефтепровода, обусловленная потоком нефти;
- нитевидная, возникающая под защитными покрытиями при их местном повреждении под действием капиллярных сил.

Особо опасными видами местной коррозии вследствие трудности их обнаружения являются межкристаллитная, стресс-коррозия (коррозийное растрескивание под напряжением), а также ножевая коррозия.

Способность сопротивляться разрушающему воздействию коррозионной среды характеризует коррозионную стойкость металла. ГОСТ 9.908—90 устанавливает десятибалльную шкалу коррозионной стойкости металлов при условии их равномерной коррозии (табл.11.1).

Таблица 11.1

Группа стойкости	Скорость коррозии, мм/год	Балл
I. Совершенно стойкие	< 0,001	1
II. Весьма стойкие	0,001...0,005	2
	0,005...0,01	3
III. Стойкие	0,01...0,05	4
	0,05...0,1	5
IV. Пониженностойкие	0,1...0,5	6
	0,5...1,0	7
V. Малостойкие	1,0...5,0	8
	5,0...10,0	9
VI. Нестойкие	> 10,0	10

Наряду с металлами состояние оборудования определяется также состоянием материалов уплотнительных устройств. Эластичные герметизирующие материалы испытывают на стойкость к воздействию

агрессивных сред при заданных температурах и продолжительности испытаний.

В сумме косвенные и прямые убытки от коррозии металлов и затраты на защиту от нее в развитых странах составляют около 4 % валового национального дохода. Часть этих затрат неизбежна, тем не менее потери от коррозии можно существенно сократить при использовании специальных методов и средств борьбы с ней. Требования к защите промышленного оборудования от коррозии установлены Единой системой стандартов защиты от коррозии и старения материалов (ЕСЗКС). Основные количественные показатели различных видов коррозии и коррозионной стойкости материалов и методы испытаний на коррозию стандартизованы целой группой ГОСТов (около 40).

По данным ООО НТЦ «Диатэкс» [12], на долю общей коррозии (утонение стенки) приходится не более 28 % отказов нефтехимического оборудования из-за коррозионных повреждений. Более важное значение имеют другие виды коррозии, при которых повреждения носят локальный характер, т. е. сосредоточены на ограниченном участке поверхности металла. Основная масса отказов обусловлена коррозионным растрескиванием (~ 24 %), межкристаллитной коррозией (~ 15 %), питтинговой коррозией (~ 14 %), коррозионно-механическим износом (~ 7 %) и другими видами коррозии (~ 13 %). Особо следует отметить повреждение металла под действием водорода (водородное растрескивание), которое не относится к коррозии, но вызывается ею.

Определяющими параметрами, приводящими оборудование, подвергшееся коррозии, в предельное состояние, являются: потеря прочности при уменьшении толщины стенки; наличие растрескивания металла, коррозионных язв, питтинга в зоне сварных швов; распространение дефектов (трещин, коррозионных язв и др.) на регламентированную нормативной документацией площадь и глубину.

Процессы зарождения и развития макродефектности в элементах конструкций определяются следующими факторами:

- величиной эксплуатационных нагрузок;
- величиной остаточных напряжений после сварки;
- химическим составом и структурой материала.

Вклад химсостава и структуры в образование макродефектности особенно весом для таких опасных явлений, как коррозионное растрескивание под напряжением, стресс-коррозия, сульфидное растрескивание и т.д.

Наличие крупнозернистой и неоднородной структуры также способствует возникновению и развитию межзеренного разрушения и образованию трещин. Данный эффект в большей степени встречается в околошовной зоне сварных соединений — зоне термического влияния (ЗТВ). Практика технического диагностирования показывает, что в элементах конструкций, имеющих крупнозернистую структуру (с размером ферритных зерен 100...300 мкм и более), доля меж-

зеренного разрушения достигает 35...40%, что облегчает зарождение и развитие трещин под воздействием остаточных сварочных, а также эксплуатационных напряжений.

Деградация (старение) материалов, включая и конструкционные стали, с течением времени проявляется в ухудшении механических свойств, определяющихся в первую очередь их химическим составом и микроструктурой, и обусловлена термодинамической неравновесностью исходного состояния материала и постепенным приближением его структуры к равновесному состоянию в условиях диффузной подвижности атомов.

Анализ эксплуатационных факторов, действующих на металл, позволяет выделить следующие процессы, приводящие его к старению:

- разупрочнение — проявляется в том, что прочностные характеристики металла (временное сопротивление или условный предел текучести) отличаются от исходных (нормативных) более чем на 5 % в меньшую сторону. Может быть следствием длительного пребывания металла при высокой температуре, например во время пожара;
- циклическое воздействие нагрузок — вызывает микропластические деформации в зонах концентрации напряжений в результате накопления дислокаций, ускоряющих развитие повреждаемости металла;
- охрупчивание — является наиболее опасным следствием изменения физико-механических свойств материала (применительно к сталям, имеющим объемно-центрированную кубическую решетку: углеродистым и малолегированным). Охрупчивание сдвигает область хрупкого разрушения в область положительных температур, резко снижает трещиностойкость и приводит к внезапному разрушению конструкции.

Изменение механических свойств, обусловленных развитием процессов охрупчивания, выражается, с одной стороны, в увеличении твердости материала и предела его текучести, с другой — в снижении вязко-пластических показателей, показателей ударной вязкости и трещиностойкости. В различных нормативных документах используются различные предельные показатели, характеризующие процессы охрупчивания. Так, в ПБ 03-605-03 «Правила устройства вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» приведена минимальная ударная вязкость материала. Для шаровых резервуаров и газгольдеров для хранения сжиженных газов под давлением в соответствии с РД 03-380-00 предельными являются увеличение отношения предела текучести к временному сопротивлению свыше 0,75 для легированных сталей и свыше 0,65 для углеродистых, при этом относительное удлинение для легированных сталей не должно быть менее 17 %, а для углеродистых — менее 19 %. Для стальных подземных газопроводов по РД 12-411-01 для труб из малоуглеродистой стали допустимое отношение фактического предела текучести к временному сопротивлению, приведенных к температуре

20 °С, должно быть не более 0,9, ударная вязкость КСУ — не менее 30 Дж/см².

Деградация наиболее характерна для полимерных материалов. Она приводит к необратимому изменению свойств под воздействием механических или термических напряжений, солнечного света, газовых и жидкостных химических сред, ионизирующих излучений и других факторов. Причины старения полимерных материалов — химические и структурные превращения макромолекул. Следствие старения — ухудшение механических характеристик и последующее разрушение полимерного изделия.

11.3. Виды охрупчивания сталей и их причины

Различают два вида охрупчивания стали: внутризеренное охрупчивание, вызванное наклепом внутренних объемов зерен ферритной матрицы, и межзеренное, обусловленное ослаблением границ зерен и снижением их когезивной (зернограницной) прочности. В общем случае суммарную степень охрупчивания ΔT_k можно представить в виде

$$\Delta T_k = \Delta T_k^3 + \Delta T_k^r,$$

где ΔT_k^3 и ΔT_k^r — степень охрупчивания вследствие наклепа зерен и ослабления их когезивной прочности соответственно.

Различают технологические и эксплуатационные факторы охрупчивания сталей. Первые возникают в процессе изготовления, транспортировки и монтажа конструкции, вторые — в процессе ее эксплуатации.

К технологическим факторам охрупчивания относятся все виды воздействий на стадиях изготовления, транспортировки и монтажа оборудования, связанных с пластическим деформированием стали (например, вальцовка оболочек, холодная штамповка днищ, подгиб кромок обечаек, усадка металла в околошовной зоне при сварке и т.д.), а также ускоренное охлаждение сварных швов, приводящее к образованию крупнозернистых структур, наводороживание сварных швов при попадании влаги в сварочную ванну или использование непросушенных материалов и т.д.

Многочисленными исследованиями (ЦНИИПСК им.Мельникова) установлено, что при пластической деформации стали, например СтЗсп, на 3...5 % плотность дислокаций в феррите возрастает на полтора-два порядка, т. е. увеличивается плотность дефектов кристаллической решетки. Наличие в металле многочисленных дислокаций, имеющих зоны растяжения, вызывает приток в эти зоны атомов внедрения типа углерода и азота. Закрепление дислокаций атомами внедрения приводит к снижению их подвижности и, соответственно,

к повышению предела текучести. Этот эффект проявляется также в элементах конструкции, испытывающих перегрузки и работающих в условиях малоциклового усталости.

Явление повышения предела текучести и сопутствующее ему охрупчивание стали получило название деформационного старения.

В ряде случаев неучет этого явления приводит к большим экономическим потерям. Так, по данным В.М. Горицкого (ЦНИИПСК им. Мельникова), вследствие недостаточной хладостойкости стали и хрупкого трещинообразования в зоне кольцевых швов в 2002 г. на Ангарском нефтехимическом комбинате были списаны четыре сварных вертикальных резервуара для хранения нефти объемом 30 000 м³ каждый. Для стенок резервуаров использовали листовую сталь 09Г2С 12-й категории толщиной 12...18 мм. Многие партии горячекатаного проката имели минимальный запас хладостойкости. Пластическая деформация стали, возникающая при рулонной технологии сборки, вызвала охрупчивание металла. В результате только 50 % обследованных листов после технологической операции рулонирования удовлетворяли требованиям ГОСТ 19281–89 к стали 09Г2С 12-й категории.

В связи с этим в нормативных документах, разработанных в последние годы, эффект деформационного старения учитывается. Так, в «Правилах устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» (§2.4.3 ПБ 03-605–03) для резервуаров с рулонной технологией сборки, по сравнению с листовой, расчетная температура металла при толщинах свыше 10 мм понижается на 5 °С.

К эксплуатационным факторам относят все виды механических, тепловых, коррозионных и химических воздействий на металл в период эксплуатации конструкции. К их числу относят:

- длительное воздействие повышенных температур (250...500 °С), приводящих к укрупнению зерна феррита и развитию обратной отпусковой хрупкости;

- появление закалочных крупнозернистых структур в зоне сварных швов при нарушении технологии сварки в процессе ремонта (попадание влаги в сварочную ванну) или при ускоренном охлаждении сварного соединения (например, при сварке в зимний период без предварительного подогрева свариваемого металла);

- наводороживание металла сварных швов (при попадании влаги в сварочную ванну или при использовании непросушенных электродов и сварочных материалов);

- коррозионное растрескивание под напряжением, обусловленное воздействием механических нагрузок и электрохимических процессов коррозии;

- сезонную подвижку фундаментов опор машины и примыкающих трубопроводов, кратковременные перегрузки в период пуска или испытаний под нагрузкой и др.

Наиболее сложно обеспечить требуемое качество сварных швов при ремонте наводороженных в период эксплуатации металлоконст-

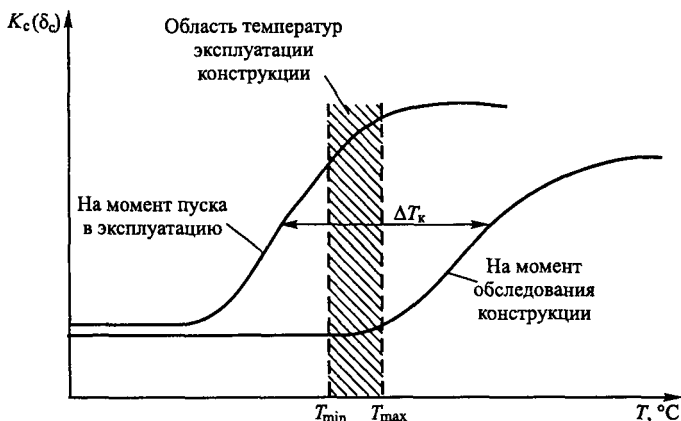


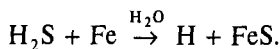
Рис. 11.1. Схема изменения температурной зависимости трещиностойкости K_c стали вследствие зернограницного охрупчивания

рукций. При сварке такого металла сварочная ванна «кипит», а наплавленный металл при затвердевании обладает большой пористостью, приводящей к растрескиванию. Для получения удовлетворительного качества сварного соединения необходимо предварительно удалять водород путем нагрева наводороженной конструкции до температуры 500...550 °C и выдержки в течение 3...4 ч.

Второй вид охрупчивания, обусловленный снижением прочности границ зерен, является наиболее опасным. При зернограницном охрупчивании смещение температуры вязко-хрупкого перехода может достигать сотен градусов (рис. 11.1) [12].

Зернограницное охрупчивание может происходить под воздействием азотирования и науглероживания поверхностных слоев стали, обусловленных наличием (при повышенных температурах эксплуатации) в среде соответственно азота или углерода, или из-за сегрегации вредных примесей типа фосфора, сурьмы, мышьяка и т.д. и выделения карбидов по границам зерен при длительном (более 100 ч) воздействии повышенных (250...500 °C) температур. Наиболее частой причиной зернограницного охрупчивания материалов оборудования газонефтедобывающей и перерабатывающей промышленности является наводороживание металла из-за наличия в технологическом продукте сопутствующего сероводорода или других водородсодержащих газовых или жидкостных сред.

Сероводород сопутствует добыче нефти и природного газа, и для разных месторождений его содержание составляет 9...25 %. В присутствии воды происходит каталитическая реакция с выделением водорода и сернистого железа



Атомарный водород, имеющий малый диаметр, проникая в металл по границам раздела фаз и несплошностям, скапливается в порах ферритной матрицы. Дальнейшее накопление водорода приводит к его молизации, сопровождающейся возникновением повышенного давления в порах. На процесс диффузии водорода влияют поле напряжений, градиент температуры и дефектность строения металла. При неблагоприятном сочетании этих факторов в металле происходит сероводородное растрескивание и расслоение, которое может возникать внутри конструкции вдалеке от ее поверхности. Склонность к сероводородному растрескиванию под напряжением (СРН) определяется особенностями структуры металла: наличием структурных неоднородностей, количеством и распределением неметаллических включений, химическим составом. СРН более характерно для высокопрочных сталей аустенитного и аустенитно-мартенситного классов и возникает чаще всего в зонах термического влияния сварных швов. Сероводородному расслоению подвергаются, как правило, сосуды, аппараты и трубопроводы из углеродистых и низколегированных сталей; в отдельных случаях может происходить СРН сварных соединений.

11.4. Контроль состава и структуры конструкционных материалов

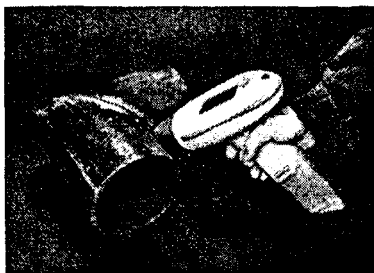
Определение состава металла осуществляют с помощью ряда методов, основанных на различных явлениях: химических (весового и объемного), физико-химических (колориметрия, фотоколориметрия, электроанализ, потенциометрия, полярография и др.) и физических (спектральный, рентгенофлуоресцентный, рентгеновский).

Наиболее традиционными, но отличающимися высокой трудоемкостью, являются методы химического анализа. Они регламентированы действующими стандартами: для углеродистых сталей и не легированного чугуна — ГОСТ 22536(1—14)—90; для легированных сталей — ГОСТ 12344—12355. Для химического анализа используют образцы, вырезанные для механических испытаний, или стружку в количестве 30...50 г, полученную засверловкой стенки конструкции.

Современные методы определения марок сталей и их идентификация основываются на результатах спектрального анализа, отличающегося универсальностью, высокой производительностью и малой стоимостью.

Различают абсорбционный и эмиссионный спектральные анализы. Абсорбционный спектральный анализ осуществляют по спектрам поглощения электромагнитного излучения, поглощаемого анализируемым объектом. Для целей технической диагностики применяют эмиссионный анализ. Источником излучения при этом является дуга постоянного тока, зажигаемая между исследуемым

Рис. 11.2. Экспресс-анализ с помощью рентгено-флуоресцентного спектрометра NITON XLt80



образцом и электродом. В современных передвижных приборах получаемый спектр не только анализируется, но и записывается и хранится в памяти встроенного микропроцессора, а также производится идентификация марок стали и содержания в ней различных элементов.

Химический и спектральный анализы стали проводят после зачистки металла (пробы) до металлического блеска в целях исключения искажения результатов анализа состава металла.

В последнее время для определения состава и идентификации сплавов находит применение метод рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. Метод основан на взаимодействии испускаемого рентгеновского излучения с веществом, в результате чего в последнем возникает возбуждение и эмиссия характерных для каждого элемента вторичных рентгеновских лучей. Интенсивность вторичного излучения и его спектральное распределение пропорциональны элементному содержанию вещества. С помощью этого метода возможен анализ порошковых, твердых и жидких проб металла всех элементов атомных номеров от 9 (фтора) до 92 (урана).

На рис. 11.2 приведен один из наиболее портативных рентгено-флуоресцентных спектрометров NITON XLt800. Спектрометр предназначен для экспресс-анализа 22 элементов от Ti (22) до Bi (83). Источником излучения служит миниатюрная рентгеновская трубка; источником питания — сменная литиевая аккумуляторная батарея.

Химический состав материалов в значительной мере определяет как их механические показатели, так и технологические свойства. Одним из важнейших технологических свойств конструкционных сталей является их *свариваемость*. Это свойство в значительной мере определяет качество изготовления и ремонта сварных металлоконструкций и наличие дефектов в их сварных соединениях. Свариваемость сталей оценивается величиной так называемого углеродного эквивалента $C_{\text{экв}}$, допустимый диапазон которого указывается в нормативной документации на конкретное оборудование. Так, для основных несущих элементов вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов по ПБ 03-605-03 углеродный эквивалент стали с пределом текучести 390 МПа и ниже для ос-

новых элементов конструкций не должен превышать 0,43. Расчет углеродного коэффициента производится по формуле

$$C_{\text{экв}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Cr}/5 + \text{Ni}/40 + \text{Cu}/13 + \text{V}/14 + \text{P}/2,$$

где C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, P — массовые доли углерода, марганца, кремния, хрома, никеля, меди, ванадия и фосфора соответственно.

В любой стали вредные примеси (сера, фосфор и газовые примеси) строго ограничиваются. Фосфор, растворяясь в феррите, снижает пластичность и ударную вязкость стали при низких температурах, т. е. увеличивает склонность стали к хладноломкости. Сера в железе не растворяется, и любое ее количество образует сульфид железа FeS, который соединяется с железом в легкоплавкую смесь — эвтектику FeS+Fe. При охлаждении стали эвтектика затвердевает последней и, в конечном итоге, располагается по границам зерен стали в виде легкоплавкой составляющей. При дальнейшей обработке стали, связанной с нагревом, особенно до температур красного каления 1100...1200 °С (например, при ковке или прокатке), эвтектика плавится и образует в стали надрывы и трещины. Сталь при этом становится хрупкой, т.е. вместо деформации происходит ее разрушение. Это явление носит название *красноломкости*.

Кислород, азот и водород даже в очень малых количествах охрупчивают сталь, поэтому допускаются только следы этих элементов.

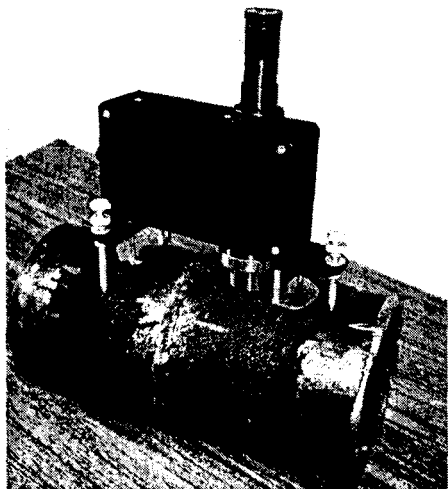
Атомы азота на границах зерен феррита образуют прослойки хрупких нитридов. Водород диффундирует в сталь в атомарном состоянии и скапливается по границам пор и неметаллических включений. Увеличиваясь в объеме при воссоединении в молекулы, водород повышает давление и создает напряженное состояние на этих участках, что может вызвать образование в них микротрещин (флокенов) и газовых раковин.

Основным методом изучения структуры является металлография. Микроструктуру металла контролируют при увеличении в 30...1500 раз с помощью оптических микроскопов на специально подготовленных образцах-шлифах (полированных и протравленных). Метод основан на различии в травимости бездефектного металла и участков с наличием пор, ликваций, неоднородности структуры и других дефектов. Строение металла, наблюдаемое при увеличении в 3000...100 000 раз с помощью электронных микроскопов, называют *субструктурой*.

При проведении технической диагностики действующего оборудования металлографические исследования могут выполняться в полевых условиях. Шлифы при этом делают без вырезки образцов непосредственно на исследуемой поверхности, а строение металла изучают с помощью переносных металлографических микроскопов (рис. 11.3).

Исследование микроструктуры позволяет установить фазовый состав, величину зерна и степень повреждения межзеренных границ, наличие и размеры неметаллических включений, степень сфероиди-

Рис. 11.3. Металлографический микроскоп МПМ-1К



зации графита и перлита, характер и глубину термической обработки, наличие межкристаллитной коррозии, наличие повреждений типа водородной коррозии и т.д.

Исследование субструктуры (тонкий структурный анализ) на электронных микроскопах дополнительно позволяет выявить дефекты кристаллической решетки, наличие и скопление дислокаций, вакансий, состояние границ кристаллических блоков различных структур.

Применение современных цифровых технологий позволяет существенно снизить трудоемкость металлографических исследований и повысить объективность количественных оценок. Регистрация изображения структуры в металлографических микроскопах при этом осуществляется с помощью цифровых фото- или видеокамер. Далее изображение вводится в компьютер, где обрабатывается с помощью специальной программы-анализатора. Существует ряд версий таких программ, как отечественных, так и зарубежных. В инженерном центре Архангельского государственного технического университета применяется отечественная программа-анализатор Grain Analyzer PRO 2.9, разработанная НИИИН МНПО «Спектр». Программа позволяет решать основные стандартные металлографические задачи и, выполняя фазовый, морфологический и гранулометрический анализы структуры, получать соответствующие объективные количественные оценки с минимальными трудозатратами.

В ряде случаев для исследования структуры стали целесообразно применять методы фрактографии (от англ. fracture – разрушение), которая изучает строение изломов. Изломы бывают двух видов: хрупкие и вязкие. Хрупкий излом происходит мгновенно, вязкий обычно начинается с зарождения и развития микротрещины и происходит в течение длительного времени.

Изучение строения изломов (фрактография) производится визуально при небольшом увеличении. Используют также методы сканирующей (на массивных образцах) и просвечивающей (реплики) электронной микроскопии с увеличениями в 1000, 4000 и 8000 раз.

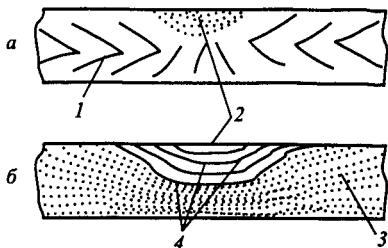
Фрактографические исследования позволяют понять механизм разрушения. Роль фрактографии особенно возрастает в тех случаях, когда в процессе изготовления или эксплуатации снижается когезивная прочность границ зерен, что проявляется в изменении строения излома. Хрупкий излом из транскристалльного, т. е. по телу зерна, становится межзеренным (по их границам) и приобретает характерную огранку. Вязкий излом в пределах макрорасстояний распространяется линейно (прямо) независимо от границ зерен, а сечение металла в зоне излома имеет утяжку.

Согласно проведенным исследованиям, увеличение доли межзеренной составляющей в изломе сопровождается смещением критических температур хрупкости в область положительных температур, т. е. охрупчиванием металла. Наиболее слабым звеном металлоконструкции, как правило, являются сварные швы, поэтому электронно-фрактографические исследования проводят обычно в целях определения степени охрупчивания (повреждения) металла различных зон сварного соединения и установления причин его трещинообразования. Изломы для электронно-фрактографического анализа получают при испытании стандартных образцов на ударную вязкость (ГОСТ 9454—78) при отрицательных температурах, обеспечивающих наличие на поверхности разрушения «хрупкого квадрата».

Фрактографические исследования обязательно проводят при расследовании причин аварий и разрушений металлоконструкций различного назначения и выявлении очага разрушения. При хрупком разрушении поверхность излома имеет кристаллический характер с характерным шевронным рельефом, при этом очаг зарождения трещины определяют по направлению сходимости лучей (ступенек) рельефа, указывающего на направление к очагу зарождения трещины. Вязкое разрушение вследствие пластической деформации имеет матовую волокнистую поверхность с хаотичным рельефом. Для усталостного разрушения свойственна относительно плоская поверхность без развитого рельефа и отсутствия признаков пластической деформации, т. е. усталостное разрушение металлоконструкций происходит при работе в области упругих деформаций при напряжениях меньше предела текучести. При длительном развитии трещины на поверхности усталостного излома обычно образуются так называемые следы «сезонной остановки». Интервалы между следами, как правило, увеличиваются по мере роста трещины. Очаг зарождения усталостной трещины выявляется по направлению сходимости концентрических следов, а также по изменению цвета излома и возможному наличию на его поверхности следов коррозии. Некоторые характерные поверхности изломов приведены на рис. 11.4.

Рис. 11.4. Характерные поверхности изломов:

а — хрупкое разрушение; *б* — усталостная трещина со следами сезонной остановки; 1 — шевронный рельеф; 2 — очаг разрушения; 3 — поверхность вязкого разрушения; 4 — следы сезонной остановки трещины



Классификация и описание изломов более подробно приведены в специальных нормативно-технических документах, например в РД 14-001-99 «Методические указания по техническому диагностированию и продлению срока службы стальных баллонов, работающих под давлением».

Металлографические и фратографические исследования позволяют установить природу охрупчивания и изменения других свойств металла, оценить безопасность дальнейшей эксплуатации оборудования и указать пути устранения неблагоприятного влияния эксплуатационных факторов.

Ухудшение механических свойств материалов может протекать как в процессе изготовления, так и при эксплуатации. Фактические механические свойства материалов на момент диагностирования могут быть определены прямым способом — проведением механических испытаний либо косвенными — с использованием результатов металлографических и фратографических исследований.

11.5. Оценка механических свойств материалов

Способность материала сопротивляться воздействию на него различных нагрузок (статических, динамических, знакопеременных и др.) оценивается совокупностью механических свойств. Эти свойства определяются в результате соответствующих испытаний материала или специально изготовленных из него образцов по стандартным методикам. Чаще всего проводят статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, твердость и динамические на ударную вязкость и усталость при переменных нагрузках.

Широко распространенным (обязательным) методом контроля механических свойств при диагностировании технического состояния металлоконструкций различного оборудования является контроль твердости материалов. Под *твердостью* понимают способность металла сопротивляться вдавливанию в него другого, более твердого тела (индентора) различной формы: шарика, конуса, пирамиды. В зависимости от формы индентора, конструкции прибора и особенностей методики измерения используют различные методы: Бри-

нелля, Роквелла, Виккерса, Шора, Польди, Лейба и др. Значения твердости, полученной различными методами, связаны функциональными зависимостями и пересчитываются обычно с помощью переводных таблиц.

Наибольшее распространение получил метод Бринелля. Твердость измеряют на приборе Бринелля вдавливанием стального закаленного шарика. Единицу твердости обозначают индексом НВ и выражают значением нагрузки P , приходящейся на 1 мм^2 поверхности сферического отпечатка $F_{\text{сф}}$, образующегося на испытуемом материале: $\text{НВ} = P/F_{\text{сф}}$. Так как измерение твердости по методу Бринелля основано на сопротивлении в месте контакта значительной пластической деформации, то между числом твердости НВ и временным сопротивлением σ_b для пластичных материалов существует зависимость (ориентировочная в первом приближении) $\sigma_b = k \cdot \text{НВ}$ (для стали $k = 0,36$).

Методом Бринелля с использованием стального закаленного шарика контролируют твердость сравнительно мягких материалов (до 450 НВ). В качестве индентора при контроле твердых материалов используют алмазные конусы или четырехгранные пирамидки.

При проведении технической диагностики в полевых условиях применяют переносные приборы, измеряющие твердость по методу отскока или резонансно-импедансным методом. В приборах с использованием резонансно-импедансного метода алмазная пирамидка закрепляется на конце металлического стержня, который под действием пьезоэлектрической пластинки колеблется с собственной резонансной частотой. По мере внедрения пирамидки в контролируемый материал частота собственных колебаний стержня изменяется. Изменение частоты пересчитывается по корреляционным зависимостям в твердость по Виккерсу, Роквеллу или Бринеллю. Принцип измерения твердости по отскоку заключается в измерении разности скоростей падения и отскока стального шарика от поверхности, зависящей от твердости материала.

Большое влияние на точность измерений при использовании переносных приборов оказывают толщина стенок контролируемой конструкции и место расположения точки контроля по отношению к примыкающим опорным элементам. Поэтому для повышения точности при контроле тонкостенных конструкций применяют поправки. Так, фактическая твердость L_{Φ} (по Лейбу) материала трубопровода рассчитывается по формуле (РД 12-421-01)

$$L_{\Phi} = L_0 + 2,21(D/S - 12,7).$$

Если $D/S = 12,7$, то $L_{\Phi} = L_0$, где L_0 — среднее арифметическое значение твердости (при числе замеров не менее трех), замеренное непосредственно на трубопроводе; D — наружный диаметр трубопровода, мм; S — толщина стенки трубы, мм.

Временное сопротивление σ_b и предел текучести $\sigma_{0,2}$ металла по величине твердости (по Лейбу) рассчитывают по формулам:

$$\sigma_b = 9,55(149 + 1,22(2,8 \cdot 10^{-6} L_0^3 - 3 \cdot 10^{-3} L_0^2 + 1,797L_\Phi - 275,125) - 12,22);$$

$$\sigma_{0,2} = k \cdot 1,22(2,8 \cdot 10^{-6} L_0^3 - 3 \cdot 10^{-3} L_0^2 + 1,797L_\Phi - 275,125),$$

где $k = 0,2$ для углеродистых сталей.

Наиболее опасным деградационным процессом является охрупчивание материала, приводящее к существенному изменению характеристик трещиностойкости и смещению хрупкого разрушения в область положительных температур. Переходу металла в хрупкое состояние способствует наличие концентратора напряжений: резкое изменение формы или сечения элемента конструкции, поверхностные риски, микротрещины и другие дефекты. Особенно это актуально для емкостного оборудования и трубопроводов, имеющих большие линейные размеры, так как в таком оборудовании возможно накопление под нагрузкой огромной упругой энергии, которая, стремясь разрядиться, разрывает конструкцию по дефекту (концентратору напряжений). Разрушение происходит с большой скоростью (одномоментно), при этом на магистральных трубопроводах отмечались разрывы, достигающие 1000 м и более. Поэтому характеристики трещиностойкости определяют на образцах с надрезом или начальной трещиной, или концентратором соответствующей формы в результате динамических или статистических испытаний. Из всех механических свойств наиболее чувствительными к охрупчиванию оказались ударная вязкость и статическая вязкость разрушения.

В современных, основанных на механике разрушения (механике трещин) расчетах остаточного ресурса и сопротивления хрупкому разрушению металлоконструкций используется такая характеристика трещиностойкости (вязкости разрушения), как K_{Ic} , K_{2c} — критические коэффициенты интенсивности напряжений (соответственно для условий плоской деформации и плоско-напряженного состояния), при достижении которых разрушение в материале приобретает необратимый лавинообразный характер и происходит его долом. Коэффициенты K_{Ic} , K_{2c} определяют по ГОСТ 25.506—85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». Вместе с тем эти испытания достаточно трудоемки и их проведение не всегда возможно. Большее распространение для оценки трещиностойкости нашли испытания на ударную вязкость, результаты которых можно пересчитать в вязкость разрушения. В некоторых случаях ударную вязкость возможно оценить косвенным неразрушающим способом с помощью магнитно-шумового метода (РД 12-421—01).

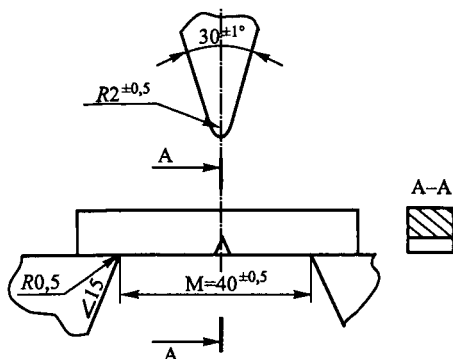


Рис. 11.5. Расположение образца относительно опор копра и бойка маятника

Ударную вязкость по ГОСТ 9454—78 определяют в результате динамических испытаний на ударный изгиб специальных образцов на маятниковых копрах при пониженных, комнатных и повышенных температурах. Метод основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра. Концы образцов располагают на опорах (рис. 11.5).

В результате испытаний определяют полную работу, затраченную на разрушение образца при ударе (работу удара). Под *ударной вязкостью* понимают отношение работы удара к начальной площади поперечного сечения образца в месте излома. Ударную вязкость, определенную при комнатной температуре, обозначают КС или a_n . При этом работу разрушения K определяют как разность энергии маятника в положении до и после удара:

$$K = mg(H_{\max} - H_{\min});$$

$$КС = a_n = \frac{K}{S_0},$$

где m — масса маятника; g — ускорение свободного падения; $H_{\max}$, $H_{\min}$ — максимальная и минимальная высота подъема маятника копра; $S_0 = HB$ — площадь сечения образца.

ГОСТ 9454—78 предусмотрено 20 типов образцов, отличающихся друг от друга шириной B , высотой H и видом концентратора: U-образного (рис. 11.6, а), V-образного (рис. 11.6, б), с усталостной трещиной Т (рис. 11.6, в).

В зависимости от вида концентратора ударную вязкость, определенную при комнатной температуре, обозначают:

- КСУ — образцы (типа Менаже) с концентратором вида U;
- КСВ — образцы (типа Шарпи) с концентратором вида V;
- КСТ — образцы с концентратором вида Т и трещиной.

Для обозначения работы удара и ударной вязкости при пониженных и повышенных температурах вводится цифровой индекс, указывающий температуру испытаний.

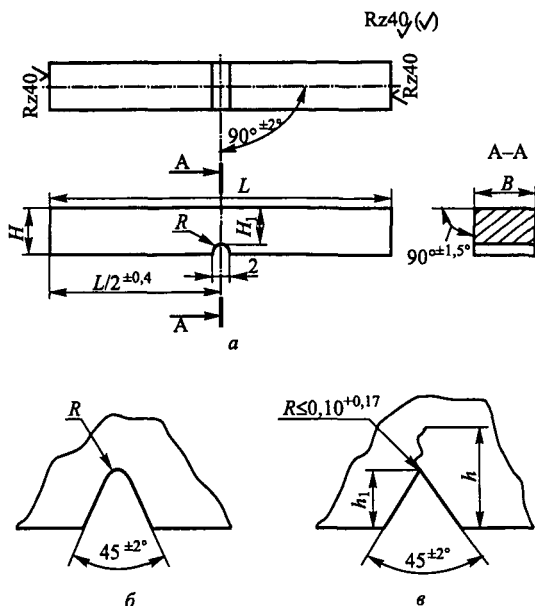


Рис. 11.6. Размеры и виды концентраторов:

a — образец с концентратором вида У; *б* — концентратор вида V;
в — концентратор вида Т

Для оценки склонности стали к хрупкому разрушению проводят серию испытаний по определению ударной вязкости при различных температурах. Важным фактором при этом является состояние поверхности излома: при хрупком разрушении излом имеет кристаллическую блестящую поверхность; при вязком — матово-волокнистую. На основании испытаний наряду с ударной вязкостью определяют процент волокна *B* в изломе и строят зависимости работы разрушения *K* или ударной вязкости разрушения (*KCU*, *KCV* или *KCT*) от температуры испытаний (рис. 11.7).

Общая ударная вязкость, например *KCU*, и работа разрушения *K* складывается из двух составляющих:

$$KCU = KCU_3 + KCU_p,$$

$$\text{или } K = K_3 + K_p,$$

где *K₃* — работа, затраченная на зарождение трещины; *K_p* — работа, затраченная на распространение трещины.

В образцах с концентратором У составляющая *KCU₃* значительна. Вместе с тем охрупчивание материала не влияет на величину *KCU₃* (*K₃*). В связи с этим более правильно оценивать склонность стали к хрупкому разрушению по работе, затраченной на распро-

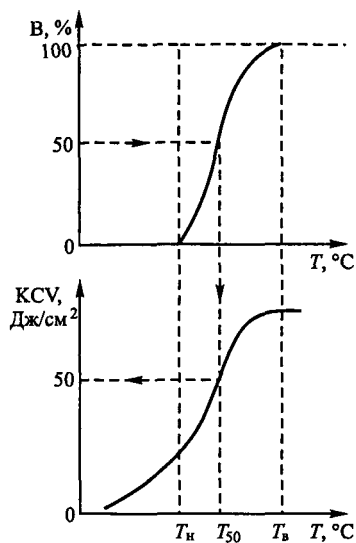


Рис. 11.7. Зависимости содержания волокна в изломе B и ударной вязкости KCV от температуры

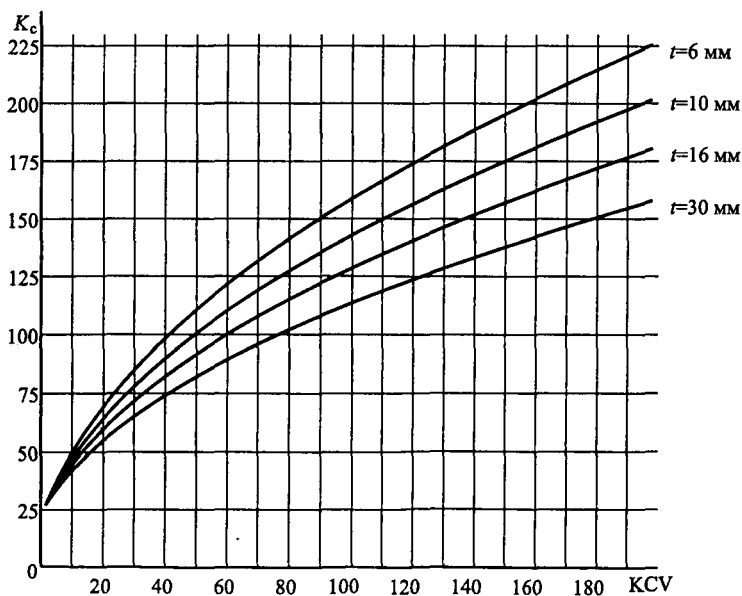


Рис. 11.8. Зависимость K_c от ударной вязкости KCV для различных толщин материала

странение трещины, — K_p . Поэтому в большинстве стран мира испытания на ударную вязкость выполняют на образцах Шарпи с V-образным надрезом. На этих образцах K_2 значительно меньше, чем на образцах Менаже с U-образным концентратором.

В последних российских НТД требования к ударной вязкости материалов также стали приводить в KCV. Например, в ПБ 03-605—03 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» приведены требования KCV в зависимости от температуры и толщины проката. Более точные результаты можно получить при испытании образцов с трещиной (вязкость в KCT).

В ряде технических документов содержатся корреляционные зависимости, позволяющие пересчитать ударную вязкость в коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} . Так, согласно рекомендации стандарта Великобритании BS 7910:1999, критическое значение коэффициента интенсивности связано с ударной вязкостью на образцах с V-образным надрезом (рис. 11.8) эмпирической зависимостью

$$K_{Ic} = \left(\frac{820\sqrt{KCV} - 1420}{t^{0,25}} + 630 \right) \frac{1}{\sqrt{1000}},$$

где KCV — значение ударной вязкости, полученной на образцах с V-образным надрезом сечением 10×10 мм при низшей эксплуатационной температуре для данной конструкции, Дж/см²; t — толщина материала, мм.

11.6. Способы отбора проб металла и получения информации о его свойствах

В металловедении информацию о механических свойствах, структуре и строении изломов получают, используя следующие способы отбора проб металла:

- 1 — вырезка массивной пробы;
- 2 — без вырезки металла;
- 3 — отбор малых проб.

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки (табл. 11.2) [12]. Первый способ, предусматривающий вырезку проб в виде круга или квадрата определенного размера, дает наиболее представительную информацию, однако требует проведения восстановительных ремонтных работ с применением сварки. Второй способ имеет принципиальный недостаток, связанный с проведением исследования в тонком поверхностном слое, часто отличающемся по структуре, химическому составу и свойствам от металла в объеме

проката. Кроме того, в этом случае невозможно использование методов фрактографии для оценки степени повреждаемости металла. Третий способ, разработанный в ЦНИИПСК им.Мельникова, в определенной степени сочетает достоинства первых двух.

Таблица 11.2

Способ отбора	Химический анализ	Определение механических свойств	Металлография	Фрактография
1	Стандартные методы	Стандартные методы	Стандартные методы на шлифах	Стандартные методы
2	Стилоскопирование	Измерение твердости переносными твердомерами. Предел текучести, временное сопротивление — по ГОСТ 22762 и методами регрессионного анализа	Метод реплик или переносными микроскопами	Не проводится
3	Стандартные методы или с помощью микрорентгеноспектральных анализаторов	Измерение твердости стационарными твердомерами. Предел текучести, временное сопротивление, критическая температура хрупкости и трещиностойкость — по ГОСТ 22762 и методами регрессионного анализа	Стандартные методы на шлифах	Стандартные методы (излом получают разрушением пробы, охлажденной в жидком азоте)

Метод малых проб основан на корреляции механических свойств с химсоставом сталей и сплавов. Корреляция описывается регрессионными зависимостями, полученными на основе обработки соответствующих экспериментальных данных. Малая проба имеет размер $(1,2...1,5) \times (5...10) \times (15...25)$ мм и отбирается обычно с внутренней стороны объекта механическим (скол, спил, срез), электроэрозионным или иным способом, обеспечивающим получение микропробы требуемых размеров без деформации металла. Места микропроб обычно подвергаются механической зачистке до устранения концентраторов напряжений без проведения дополнительного восстановительного ремонта.

Выбор способа отбора проб и общий объем исследований зависит от характера решаемой задачи и в каждом конкретном случае определяется организацией, проводящей техническое диагностирование.

При отборе малых проб, используя методы регрессионного анализа, в принципе возможно получение того же объема информации о металле, как и при вырезке массивной заготовки, а именно о прочностных характеристиках, о категории стали и степени ее повреждаемости (охрупчивания) в процессе эксплуатации. Это позволяет оценить весь комплекс фактических свойств металла при проведении технического диагностирования или паспортизации оборудования. Основные методические трудности оценки механических

свойств стали при использовании малых проб связаны с установлением регрессионных зависимостей, позволяющих оценивать свойства стали по результатам исследования малых проб, а также с необходимостью принятия специальных мер, позволяющих исключить пластическую деформацию металла при отборе проб.

Методика оценки механических свойств с использованием микропроб вошла в ряд нормативных документов, в частности, в РД 03-380-00 «Инструкция по обследованию шаровых резервуаров и газгольдеров для хранения сжиженных газов под давлением», РД 03-410-01 «Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов».

Основные прочностные характеристики — предел текучести σ_T и предел временного сопротивления σ_B на микропробах определяют по результатам спектрального (химсостав), металлографического и дюрометрического (измерение твердости) анализов по следующим уравнениям регрессии:

$$\sigma_B = 0,34HB(HV);$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_n^2} + \sqrt{\Delta\sigma_{тр}^2 + \Delta\sigma_d^2 + \Delta\sigma_{д.у}^2} + \frac{K_y}{\sqrt{d}},$$

где σ_0 — напряжение трения решетки α -железа, $\sigma_0 = 30$ МПа; σ_n — напряжение за счет упрочнения стали перлитом, $\sigma_n = 2,4$ П, МПа, (здесь П — процент перлитной составляющей); $\Delta\sigma_{тр}$ — напряжение за счет упрочнения твердого раствора легирующими элементами в зависимости от их концентрации в процентах по массе, МПа:

$$\Delta\sigma_{тр} = 4670(C+N) + 33Mn + 86Si + 31Cr + 30Ni + 11Mo + 60Al + 39Cu + 690P + 3V + 82Ti;$$

$\Delta\sigma_d$ — напряжение за счет упрочнения дислокациями, оцениваемое по плотности дислокаций ρ , $\Delta\sigma_d = 5Gb\rho^{1/2}$; $\sigma_{д.у}$ — напряжение за счет упрочнения стали дисперсными частицами;

$$\Delta\sigma_{д.у} = \frac{0,46Gb}{\lambda - D} \ln\left(\frac{\lambda - D}{2b}\right),$$

где G — модуль сдвига ($8,4 \cdot 10^4$ МПа); b — вектор Бюргерса ($2,5 \cdot 10^{-7}$ мм); λ — межчастичное расстояние, мм; D — размер (диаметр) дисперсных упрочняющих частиц, мм; K_y — коэффициент, $K_y = 20$ МПа $\cdot$ мм $^{1/2}$; d — средний условный (эффективный) размер зерна феррита, мм.

Степень охрупчивания металла в процессе эксплуатации при отборе микропроб оценивается по результатам дюрометрических и

электронно-фрактографических анализов. Определение степени охрупчивания ΔT_k в результате пластической деформации (наклепа) в зонах изменения формы элемента конструкции или выявленных зонах концентрации напряжений (например, с помощью ММП) осуществляется по соотношению

$$\Delta T_k = K_n \Delta HV,$$

где $K_n = 0,16 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{МПа}$; $\Delta HV = HV^3 - HV^n$; HV^3, HV^n — твердость металла по шкале Виккерса после эксплуатации (на момент измерения твердости) и в исходном состоянии (до эксплуатации) соответственно.

При отсутствии сведений о твердости стали в исходном состоянии в качестве исходного принимают среднее значение трех измерений твердости вне зоны развития пластической деформации (концентрации напряжений) соответствующего элемента конструкции. В этом случае твердость как в исходном состоянии, так и после эксплуатации измеряют с помощью переносных твердомеров.

Степень межзеренного охрупчивания металла, вызванную ослаблением границ зерен из-за наводороживания, сульфидного и хлоридного растрескивания и иных неблагоприятных процессов, определяют по величине межзеренного разрушения ΔF_m в хрупком изломе по сравнению с хрупким изломом исходного состояния. Изломы для электронно-фрактографического анализа получают при разрушении микропроб, предварительно охлажденных в жидком азоте для получения хрупкого излома, обеспечивающего наличие на поверхности «хрупкого квадрата». Определение доли межзеренной составляющей F_m , указывающей на повреждение границ зерен, осуществляют в соответствии с методическими указаниями МПС-81 «Расчеты на прочность в машиностроении. Фрактографический метод определения критической температуры хрупкости металлических материалов» (М.: ВНИИНМАШ, 1981).

Суммарную степень охрупчивания стали ΔT_k , включающую внутризеренное охрупчивание, вызванное наклепом внутренних объемов зерен, и межзеренное, обусловленное ослаблением границ зерен, определяют по уравнению

$$\Delta T_k = \Delta T_k^m + \Delta T_k^r = A + K_f \Delta F_m + K_n \Delta HV,$$

где $A = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ для основного металла с ферритно-перлитной структурой и $A = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ для металла сварного шва и околошовной зоны со структурой мартенсита и бейнита; $K_f = 1,0 \dots 3,0 \frac{^\circ\text{C}}{\%}$; $\Delta F_m = F_m^3 - F_m^n$;

F_m^3, F_m^n — приведенная доля межзеренной составляющей после эксплуатации (на момент проведения анализа) и в исходном состоянии (до эксплуатации), %.

12. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ

12.1. Методология оценки остаточного ресурса

Наряду с установлением технического состояния оборудования второй важнейшей задачей диагностики является определение (прогнозирование) остаточного ресурса. Принципиальные положения методологии определения остаточного ресурса изложены в РД 09-102—95 «Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России».

В качестве базовой концепции предлагается подход, основанный на принципе безопасной эксплуатации по техническому состоянию, согласно которому оценка технического состояния объекта осуществляется по параметрам технического состояния, обеспечивающим его надежную и безопасную эксплуатацию, а остаточный ресурс устанавливается по определяющим параметрам технического состояния. В качестве определяющих параметров технического состояния принимаются параметры, изменение которых (в отдельности или в некоторой совокупности) может привести объект в неработоспособное или предельное состояние.

В общем случае математическое ожидание остаточного ресурса по времени t определяется двумя составляющими: регулярной $y(t)$ и случайной $z(t)$:

$$T(t) = y(t) + z(t).$$

Регулярная составляющая $y(t)$ отражает детерминированную основу процесса и является преобладающей. Для описания регулярной составляющей в зависимости от вида определяющих параметров принимаются различные аппроксимирующие функции: линейная, степенная, экспоненциальная и др. Случайная составляющая $z(t)$ обуславливает дисперсию математического ожидания $T(t)$ и определяется статистическими вероятностными законами распределения параметров, влияющих на величину T . В большинстве случаев определение $z(t)$ представляет значительные трудности.

В тех случаях, когда определяющие параметры удастся оценить в детерминированных значениях (однозначно), гарантированный остаточный ресурс определяется по минимальным (либо максимальным) значениям установленных при диагностировании оборудования параметров. Для крупных объектов, когда оценку технического состояния обычно осуществляют по результатам выборочного контроля параметров, имеющих некоторый естественный разброс, при прогнозировании остаточного ресурса используют вероятностные показатели.

Основным показателем остаточного ресурса, прогнозируемого по результатам выборочного контроля, является гамма-процентный ресурс, задаваемый двумя численными значениями: наработкой и выраженной в процентах вероятностью того, что в течение этой наработки предельное состояние не будет достигнуто. Важным показателем является также средний ресурс, представляющий собой наиболее вероятное (ожидаемое) значение ресурса объекта, по которому можно планировать затраты на ремонт или замену.

Гамма-процентный ресурс определяет минимальное значение ресурса, которое способен отработать объект при обеспечении нормативных запасов прочности с доверительной вероятностью γ , достаточно близкой к единице. При этом остается некоторая вероятность $(1 - \gamma)$ выхода контролируемых параметров за пределы нормативных значений. Выбор вероятности должен осуществляться в зависимости от назначения и степени ответственности объекта (для ответственных $\gamma = 90...95\%$). Если переход в предельное состояние (ресурсный отказ) связан с опасностью для жизни и здоровья людей или тяжелыми экологическими последствиями (при отсутствии непрерывного контроля за техническим состоянием), то устанавливают так называемый назначенный ресурс, который принимается заведомо меньше расчетного ресурса. Кроме того, по РД 09-102-95 ресурс считается назначенным, если при установлении остаточного ресурса не определялась его вероятность.

На основании данных по оценке технического состояния и остаточного ресурса специализированной организацией, проводившей техническое диагностирование и оценку остаточного ресурса объекта, принимается решение о его дальнейшей судьбе: продолжение эксплуатации при паспортных параметрах после выполнения необходимого ремонта; дальнейшая эксплуатация на пониженных рабочих параметрах; прекращение эксплуатации объекта и его списание.

Для оценки (прогнозирования) остаточного ресурса могут быть использованы следующие основные методы:

- математическое моделирование деградиационных процессов и на этой основе расчет предполагаемого ресурса до достижения определяющими параметрами их предельного значения;
- графическая или аналитическая экстраполяция трендов определяющих параметров при наличии сведений об их величине за предыдущий период (трендом параметров называют тенденцию их изменения, а графическое или аналитическое продолжение тренда в будущее время – экстраполяцией);
- анализ статистических данных об отказах и ресурсах аналогичных объектов, эксплуатируемых в тех же или похожих условиях.

При наличии большого числа наблюдений последний метод позволяет определить гамма-процентный ресурс по кривой распределения ресурсного показателя и является наименее трудоемким.

В экстраполяционных методах на базе трендирования, нашедших наибольшее распространение, ожидаемый ресурс объекта устанавли-

вается достижением определяющими параметрами предельной величины. Оценка вероятности исчерпания остаточного ресурса при этом возможна, но, как правило, представляет большие трудности и производится только тогда, когда известен закон распределения определяющего параметра.

Применение экстраполяционных методов позволяет эффективно прогнозировать остаточный ресурс, если контроль параметров технического состояния объекта осуществлялся в течение длительного времени. Эти методы с использованием результатов вибродиагностики являются основными для роторных машин, в первую очередь для ГПА большой единичной мощности, компрессоров и др. Прогнозируемая величина остаточного ресурса при этом определяется с учетом доверительных границ, обусловленных погрешностями методики измерений (см., например, РД 153-39.4Р-124—02).

Критерии перехода оборудования в предельное состояние определяются типом оборудования и условиями его эксплуатации. Так, для оборудования, работающего при повышенных температурах, основным критерием работоспособности является длительная прочность. Параметром, определяющим остаточный ресурс оборудования, при этом является степень структурных повреждений материала, определяемая в результате металлографических исследований. Для сосудов, аппаратов и трубопроводов нефтегазовой промышленности основными критериями перехода в предельное состояние являются: статическая или циклическая прочность; устойчивость несущих металлоконструкций; нарушение герметичности.

Определяющими параметрами в зависимости от критерия предельного состояния и доминирующего механизма повреждения являются: глубина и площадь поверхностного разрушения (износа, эрозии, поверхностной или язвенной коррозии); напряженное состояние материала и его механические характеристики; состояние изоляции; величина переходного сопротивления изоляции; величина и характер прилагаемых нагрузок и др. Разработанные в настоящее время методики оценки остаточного ресурса по различным определяющим параметрам приведены в специальной технической литературе и нормативно-технических документах. Расчетное значение остаточного ресурса используют не только для назначения срока службы оборудования до перехода его в неработоспособное или предельное состояние, но и для установления последующей периодичности технического диагностирования и разработки компенсирующих мероприятий с целью снижения скорости развития доминирующих механизмов повреждений в процессе дальнейшей эксплуатации.

Вместе с тем следует отметить, что в настоящее время из-за недостаточности научных данных остаточный ресурс не может быть определен с требуемой достоверностью в целом ряде случаев: например, при развитии коррозионного растрескивания под напряжением, зернограницного и водородного охрупчивания и т. п. Наиболее часто применяемые методики оценки остаточного ресурса рассмотрены ниже.

12.2. Оценка ресурса при поверхностном разрушении

Оценка остаточного ресурса при поверхностном разрушении локальных участков технологического оборудования производится по наихудшим результатам сплошного измерения утонения стенок этих участков. Случайная составляющая, влияющая на величину ожидаемого остаточного ресурса, минимальна, определяется точностью измерений и в расчетах не учитывается. Расчетный остаточный ресурс в этом случае определяется из выражения

$$T = \frac{S_{\phi} - S_p}{a_{\text{ср}}},$$

где S_{ϕ} — фактическая толщина стенки элемента, мм; S_p — расчетная минимально допустимая толщина стенки по условию прочности или устойчивости, мм; $a_{\text{ср}}$ — средняя скорость поверхностной коррозии (эрозии или износа), мм/г.

$$a_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ном}} + C_0 - S_{\phi}}{T_3},$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная толщина стенки оборудования по его паспорту, мм; C_0 — допуск на толщину стенки, мм; T_3 — время от начала эксплуатации до момента измерения S_{ϕ} , г.

Поверхности технологического оборудования нефтегазовой промышленности достигают большой величины — десятков и сотен квадратных метров, поэтому измерить глубину разрушения на всех участках этих поверхностей практически невозможно. В связи с этим измерение глубин разрушения осуществляют выборочно в местах наибольшего разрушения. В тех случаях, когда такие места легко выявляются и известны причины повышенной скорости разрушения (повышение температуры, скорости или концентрации технологической среды), оценка остаточного ресурса по средней скорости коррозии также оказывается эффективной. Если же условия эксплуатации для всех участков обследуемой поверхности одинаковы, а неравномерность глубины разрушения в различных точках поверхности существенна и при этом невозможно (или нецелесообразно) измерить глубины разрушения на всех участках, измерения осуществляют выборочно.

В общем случае *выборочным* называют контроль, при котором отношение $F/F_0 < 1$, где F — площадь контролируемой поверхности; F_0 — площадь элементарного участка измерения. Достоверность результатов при выборочном контроле зависит от величины отношения F/F_0 и степени неравномерности коррозии. Результаты этих измерений подвергают обработке вероятностно-статистическими методами. Аналитическая оценка ресурса с использованием выборочного

контроля при поверхностном разрушении, приводящем к утонению стенок оборудования вследствие изнашивания, коррозии или эрозии, выполняется по алгоритму, рекомендованному методическими указаниями «Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении» (РД 26-10-87).

Гамма-процентный ресурс рассчитывают по формуле

$$T_{\gamma} = T_{\text{ср}} (1 - U_{\gamma} V_{\gamma}),$$

где U_{γ} — квантиль нормального распределения с заданной вероятностью γ ; V_{γ} — коэффициент вариации ресурса, определяемый по РД 26-10-87 в зависимости от коэффициента вариации глубин разрушения.

Средний ресурс $T_{\text{ср}}$ определяют по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{h_{\text{пред}} K_{b_i}}{a_{\text{ср}} (-\ln \beta)^{1/b_i}},$$

где $h_{\text{пред}}$ — предельно допустимая глубина разрушения стенки силового элемента сосуда до достижения расчетной толщины (без суммы прибавок); K_{b_i} — параметр распределения Вейбулла; β — установленная доля поверхности разрушения на предельно допустимую глубину $h_{\text{пред}}$, $\beta = 5\%$.

Предельно допустимая глубина разрушения $h_{\text{пред}}$ на дату выполнения оценки ресурса определяется как разница между начальным запасом толщины стенки $h_{\text{нач}}$ и средней глубиной разрушения $h_{\text{ср}}$, полученной в результате измерений:

$$h_{\text{пред}} = h_{\text{нач}} - h_{\text{ср}} = (S_{\text{ном}} - S_p) - h_{\text{ср}}.$$

Для иллюстрации рассмотренной методики расчета остаточного ресурса по РД 26-10-87 рассмотрим пример, приведенный в работе А.В. Митрофанова и С.Б. Киченко «Сравнение результатов расчета остаточного ресурса резервуара с поверхностными коррозионными дефектами» // Безопасность труда в промышленности. — М., 2001. — № 7. — С. 27—28.

Пример. Требуется определить остаточный ресурс нефтяного резервуара, находившегося в непрерывной эксплуатации (с момента ввода до контроля толщины стенок) пять лет ($T_s = 5$) с вероятностью 0,95.

В качестве основного силового элемента, по которому рассчитывается ресурс, принят нижний пояс резервуара. Внутренний диаметр D и высота его нижнего пояса H_n равны соответственно 16 и 2 м. Площадь контролируемой поверхности $A \sim 100 \text{ м}^2$. Номинальная толщина стенки нижнего пояса $S_{\text{ном}} = 10 \text{ мм}$, расчетная толщина, т. е. минимально допустимая, $S_p = 6 \text{ мм}$.

При диагностировании нижнего пояса резервуара изнутри была обнаружена его равномерная поверхностная коррозия, явных локальных повреждений металла в виде язв и питтингов не имелось. При измерении толщины стенок нижнего пояса резервуара в 13 точках (в 12 равномерно расположенных на четырех диаметрально противоположных образующих точках, а также в одной дополнительной, произвольно взятой точке) ультразвуковым толщиномером получили следующие результаты: 8,7; 8,8; 8,5; 8,6; 9,0; 8,9; 8,6; 8,4; 8,8; 8,6; 8,0; 8,3 и 8,6 мм.

Диаметр пьезоэлектротрансформатора (ПЭП) ультразвукового толщиномера составляет 8 мм, а площадь $F_0 \sim 50 \text{ мм}^2$.

После обработки соответственно получили: $h_{\text{ср}} = 1,4 \text{ мм}$; $h_{\text{max}} = 2 \text{ мм}$; $a_{\text{ср}} = 0,28 \text{ мм/г}$; $K_{b_i} = 0,95$; $b_i = 9,5$; $V_T = 0,0527$. Тогда

$$h_{\text{пред}} = S_{\text{ном}} - S_p - h_{\text{ср}} = 10 - 6 - 1,4 = 2,6 \text{ мм};$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{h_{\text{пред}} K_{b_i}}{a_{\text{ср}} (-\ln \beta)^{1/b_i}} = \frac{2,6 \cdot 0,95}{0,28(-0,05)^{1/9,5}} = 7,87 \text{ г};$$

$$T_{\gamma} = T_{\text{ср}}(1 - U_{\gamma} V_T) = 7,87(1 - 3 \cdot 0,0527) = 6,6 \text{ г}.$$

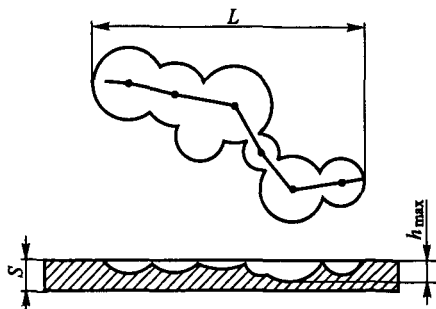
В дополнение к рассмотренному примеру следует отметить, что коррозионный процесс отличается нестабильностью интенсивности протекания во времени, его скорость нуждается в уточнении.

12.3. Прогнозирование ресурса при язвенной коррозии

Данный вид коррозии является наиболее труднопредсказуемым и сложным для оценки степени опасности конкретно выявленных дефектов из-за нестабильности своего развития. Иногда коррозионный процесс затормаживается настолько, что язвы практически не растут. Часто развитие язвенного коррозионного дефекта после достижения каких-то определенных размеров значительно затормаживается или вовсе прекращается в плане (по площади) и происходит в дальнейшем только в глубину.

До последнего времени для оценки реальной остаточной прочности объектов с коррозионными язвенными дефектами использовались гидравлические испытания. Вместе с тем хорошо известно, что на объектах, связанных с добычей и транспортировкой газа, содержащего H_2S , а также сернистой нефти, оставшаяся после испытаний вода может послужить основной причиной их последующего интенсивного коррозионного повреждения. Кроме того, возникают дополнительные сложности из-за необходимости использования огромного количества воды для испытаний (например, при заполнении магистральных трубопроводов и нефтехранилищ) и негативных эко-

Рис. 12.1. Схема коррозионного повреждения, используемого при анализе прочности по критерию B31G



логических последствий при сбросе загрязненной воды в окружающую среду.

Гидравлические испытания иногда наносят вред изделию, увеличивая размеры имеющихся микротрещин и снижая рабочий ресурс. В отличие от прошлых лет, когда обнаруженные дефекты удалялись (в трубопроводах путем вырезки «катушек»), такая практика ремонта в настоящее время неприемлема. Это обусловлено тем, что в результате своевременной диагностики количество выявляемых дефектов неизмеримо возросло, при этом далеко не все из них представляют реальную угрозу и их удаление или ремонт не являются обязательными.

Для оценки степени опасности язвенных дефектов в трубопроводах в мировой практике с середины 1980-х годов стал широко применяться расчетный метод, разработанный американскими и канадскими специалистами и известный как критерий B31G. В России он также начинает применяться и развивается рядом специализированных организаций, в том числе ОАО «Техдиагностика», «Газпром», «Оренбурггазпром», ВНИИГАЗ и др.

Расчетный метод по критерию B31G базируется на малом количестве исходных данных — двух размерах дефекта (протяженности его вдоль оси трубопровода и глубине относительно номинальной толщины стенки) и механической характеристике материала — минимальном пределе текучести.

Исходя из этих параметров рассчитывается критическое сочетание длины и глубины дефекта, которое может привести к разрушению.

По данным ОАО «Техдиагностика»*, при большей длине (рис. 12.1) вдоль оси трубопровода критический дефект будет иметь меньшую глубину, и наоборот.

На этой основе, зная $\sigma_{T \min}$, можно построить график (рис. 12.2), определяющий по сочетанию длины L и глубины $h_{\max}$ при толщине

* См.: Митрофанов А. В., Киченко С. Б. Расчет остаточного ресурса трубопроводов, эксплуатирующихся на объекте предприятия «Оренбурггазпром» // Безопасность труда в промышленности. — М., 2001 — № 3. — С. 30—32.

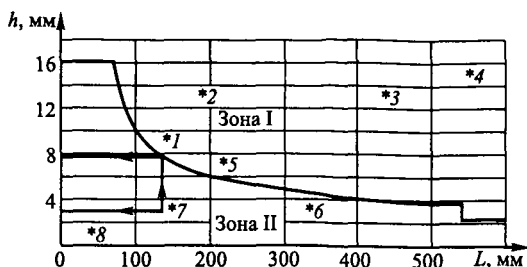


Рис. 12.2. Схема определения критических язвенных дефектов: зона I — дефекты (1–5), требующие немедленного устранения; зона II — допустимые дефекты (6–8), требующие контроля за их развитием

стенки S критические язвенные дефекты, представляющие реальную опасность для данного трубопровода.

Очевидно, что с помощью того же графика можно определять и остаточный ресурс трубопровода. Критерий предельного состояния трубы в данном случае — сочетание глубины и протяженности вдоль оси трубы коррозионного дефекта, отраженное на графике граничной кривой, разбивающей поле графика на две зоны. Предположив, что конкретный дефект затормозил свое развитие в плане (по площади) и растет далее в основном в глубину, для ориентировочной оценки ресурса можно исходить из средней скорости коррозии $a_{\text{ср}}$, определяемой из выражения

$$a_{\text{ср}} = \frac{h_{\text{max}}}{T_3},$$

где h_{max} — глубина дефекта в зоне максимальных повреждений, мм; T_3 — срок службы объекта с начала его эксплуатации, г.

Предельно допустимую глубину дефекта (язвы) $h_{\text{пред}}$ определяют по графику (см. рис. 12.2) при известной протяженности дефекта вдоль трубы L . Тогда остаточный ресурс можно определить из выражения

$$T_{\text{ост}} = \frac{h_{\text{пред}} - h_{\text{max}}}{a_{\text{ср}}}.$$

Например, если для язвенного дефекта 7 (см. рис. 12.2) глубиной 3 мм с протяженностью проекции вдоль оси 135 мм при номинальной толщине стенки трубы 20 мм критическая глубина составляет 7,5 мм, а средняя скорость коррозии на момент обнаружения язвы — 1 мм/г, то определенный в данный момент времени расчетный остаточный ресурс

$$T_{\text{ост}} = \frac{7,5 - 3}{1} = 4,5 \text{ г.}$$

В связи с тем, что вероятность распределения остаточного ресурса здесь не определялась, ресурс назначают, основываясь на расчетной величине $T_{\text{ост}}$, а также степени ответственности объекта и тяжести возможных последствий при его разрушении. Учитывая нестабильность скорости коррозии, ее желательно уточнить в процессе эксплуатации в пределах назначенного ресурса объекта и на этом основании корректировать величину $T_{\text{ост}}$.

Аналогичная по смыслу методика начинает применяться и в нормативно-технических документах, действующих в России. Так, в РД 12-411-01 «Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов» указывается, что повреждение труб в виде коррозионных язв (питтингов) приводит к неравномерному распределению напряжений в стенке газопровода, увеличивая их в местах наиболее глубоких повреждений. Расчетный остаточный ресурс с учетом размеров язвенной (питтинговой) коррозии и действующих напряжений определяют по формуле

$$T_p = \frac{h_{\text{пред}} - h_{\text{max}}}{a_{kt}},$$

где $h_{\text{пред}}$ — критическая (предельная) глубина дефекта при действующем уровне напряжений и наибольшем размере L коррозионной язвы по ее верхней кромке:

$$h_{\text{пред}} = S_{\text{ном}} - L \left(\frac{0,19 P_{\Phi}}{0,75 \sigma_{\tau}} \right)^{0,5},$$

где $S_{\text{ном}}$ — начальная (номинальная) толщина стенки трубы, мм; P_{Φ} — фактическое рабочее давление в газопроводе, МПа; σ_{τ} — предел текучести металла трубы, МПа; a_{kt} — усредненная скорость роста коррозии, мм/г:

$$a_{kt} = \frac{h_{\text{max}} + L}{2} \frac{1}{T_s}.$$

12.4. Прогнозирование ресурса по трещиностойкости и критерию «течь перед разрушением»

Важнейшим фактором, определяющим работоспособность конструкций, является их сопротивляемость воздействию циклических нагрузок. По мере увеличения числа циклов нагружений в металле происходит накопление повреждений в виде образования полос скольжения, скопления дислокаций в зернах и снижения их когезив-

ной прочности, что в последующем приводит к зарождению и развитию микро- и макротрещин.

Помимо числа циклических нагружений процесс накопления повреждений определяется механическими характеристиками материала и уровнем действующих напряжений вне зависимости от их природы: как эксплуатационных, так и остаточных (начальных). Циклические нагрузки могут быть детерминистическими или случайными. Примерами простейших детерминистических нагрузок являются циклы заполнения и опорожнения резервуаров, пульсация давления в трубопроводах и др. К случайным воздействиям можно отнести ветровые нагрузки, нагрузки от атмосферных осадков, сейсмические волны в грунте при землетрясениях и др.

Так, вертикальные цилиндрические резервуары могут находиться под действием пульсационного давления ветра. Для вертикальных цилиндрических резервуаров характерны малые периоды собственных колебаний, находящихся в области спектра пульсаций скорости ветра. Для полых резервуаров диаметром 46 м и высотой 12 м при толщине стенки 15 мм период основного тона (гармоники) собственных колебаний равен 0,03 с, а для заполненных на всю высоту водой — 0,27 с. Для таких сооружений учитывают низкочастотную часть ветрового спектра [14].

Область разрушения при числе циклов нагружения от 10^3 до $5 \cdot 10^5$ называется *малоцикловой*. Она характеризуется тем, что разрушение происходит при числе циклов меньше базового (при котором определяется предел выносливости материала), а напряжения при заданном числе циклов нагружений превышают предел ограниченной выносливости.

В настоящее время используют два основных метода расчета остаточного ресурса при малоцикловых нагрузках: по ГОСТ 25859—83 «Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках»; по известным закономерностям кинетики развития усталостных трещин в соответствии с канонами механики разрушения.

По ГОСТ 25859—83 выполняют (без учета деградации свойств материалов и др.) расчет ресурса, обеспечивающий получение гарантированного запаса. Расчет сводится к определению коэффициента U , который должен быть меньше единицы:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{[N_i]} < 1,$$

где N_i , $[N_i]$ — фактическое и допустимое число циклов нагружений при действии напряжений i -го вида.

Допустимое число циклов нагружений $[N_i]$ определяют по кривой усталости соответствующей марки стали в малоцикловой области. Условно считается, что при достижении $U = 1$ возможно образование трещин в металлоконструкциях и их ресурс исчерпан. На са-

мом деле металлоконструкции до своего разрушения при медленном росте трещин могут работать еще длительное время.

Процесс разрушения конструкций с трещинами является двухстадийным. Первая стадия характеризуется стабильным ростом трещин до достижения ими некоторого критического значения. Вторая стадия — лавинообразный рост трещин, приводящий к разрушению конструкции. Соотношение продолжительности этих стадий определяется свойствами конструкционного материала. Для пластичных (вязких) материалов стабильный рост трещины продолжается вплоть до полного разрушения конструкции, при этом в окрестности трещины наблюдаются значительные пластические деформации. Для высокопрочных сталей пластические деформации в зоне трещины минимальны, и ее стабильное развитие прекращается при достижении критического значения.

Наиболее опасная ситуация имеет место при хрупком и квази-хрупком разрушении, когда стадия стабильного развития трещины и сопутствующая пластическая деформация резко уменьшаются и происходит лавинообразное разрушение конструкции, характеризующееся минимальной работой разрушения (см. 11.5). Это состояние может возникнуть при эксплуатации оборудования при низких температурах (ниже минимальных температур, разрешенных для данных марок сталей), при деградации механических свойств, сопровождающейся снижением вязкости разрушения (охрупчиванию) материала. В механике разрушения (механике трещин) в качестве основного параметра, определяющего трещиностойкость конструкций, используют коэффициент интенсивности напряжений K_I , под которым понимается относительный рост максимальных напряжений в вершине трещины. Коэффициент K_I учитывает размер и форму элемента конструкции B , протяженность трещины l и уровень номинальных напряжений σ_n , т. е.

$$K_I = \sigma_n f(l, B).$$

Процесс разрушения материала под действием циклических напряжений называется *усталостью*. Закономерности зарождения и роста усталостных трещин рассматривают, используя зависимость ее скорости $v = dl/dN$ от максимального значения $K_{\max}$ или размаха ΔK коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины.

Графическое представление зависимости скорости роста усталостной трещины от параметра разрушения называется кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР). Типовая КДУР, построенная в логарифмических шкалах по обеим осям, приведена на рис. 12.3. Область развития трещины ограничивается пороговым (K_{th} или ΔK_{th}) значением коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не растет, и критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} , при достижении которого происходит разрушение.

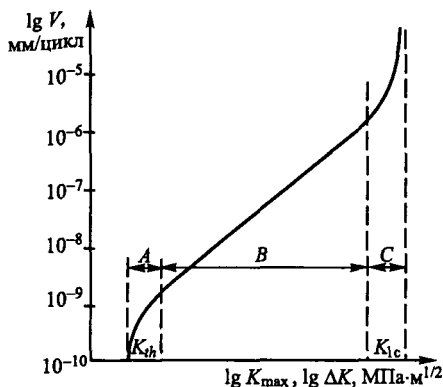


Рис.12.3. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения:

A — зона зарождения и начального роста; *B* — зона непрерывного роста; *C* — зона приближения к статическому разрушению

В дополнение необходимо отметить, что даже уже возникшие в конструкции микроскопические усталостные трещины при определенных условиях могут полностью приостановить свой рост. Например, перераспределением напряжений при пластическом деформировании конструкций, созданием препятствий на пути движения трещины (засверливание, создание зоны термических напряжений) и др.

Полное математическое описание КДУР представляют в виде набора различных уравнений. Средний участок КДУР (зона *B*), представляющий наибольший интерес для оценки остаточного ресурса, аппроксимируется уравнением

$$\frac{dl}{dN} = CK_{\max}^m = C\Delta K^m,$$

где *l* — длина трещины; *N* — число циклов нагружения; *C*, *m* — экспериментальные константы материала, зависящие в основном от предела текучести [14]; ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжений:

$$\Delta K = (K_{\max} - K_{\min});$$

где $K_{\max}$, $K_{\min}$ — максимальное и минимальное значения коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины, соответствующие действующим в течение цикла максимальным $\sigma_{\max}$ и минимальным $\sigma_{\min}$ напряжениям:

$$K_{\max} = y\sigma_{\max}\sqrt{\pi l}; \quad K_{\min} = y\sigma_{\min}\sqrt{\pi l},$$

где *y* — коэффициент, зависящий от геометрии трещиноподобного дефекта и толщины элемента конструкции, для стального листа с трещиной на краю *y* = 1,12.

Расчет остаточного числа циклов до разрушения при наличии распространяющихся усталостных трещин выполняют путем интегрирования уравнения скорости роста трещины в пределах ее развития от начальной l_0 до критической l_k длины.

Заменим $\Delta K = y\sqrt{\pi l} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = y\sqrt{\pi l} \Delta\sigma$.

Разделим переменные и проинтегрируем:

$$dN = \frac{1}{C\pi^{\frac{m}{2}} y^m \Delta\sigma^m l^{\frac{m}{2}}} dl$$

$$\int_0^N dN = \frac{1}{C\pi^{\frac{m}{2}} y^m \Delta\sigma^m} \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l^{\frac{m}{2}}}$$

Условно обозначим $x = -\frac{m}{2}$, тогда интеграл преобразуется к табличному и его решение примет вид

$$N = \frac{2}{C(2-m)\pi^{\frac{m}{2}} y^m \Delta\sigma^m} \left[\frac{1}{l_k^{(m-2)/2}} - \frac{1}{l_0^{(m-2)/2}} \right]$$

Данную формулу используют при высокочастотном нагружении и большом числе циклов нагружений при действии сравнительно малых напряжений (обычная усталость), когда усталостные повреждения накапливаются параллельно с повреждениями от ползучести. Сосуды, аппараты и трубопроводы нефтегазовой промышленности в течение своего жизненного цикла испытывают обычно малое число циклов нагружений (от нескольких сотен или тысяч) с медленной скоростью. При этом процесс накопления повреждений, приводящих к последующему разрушению, является в основном следствием ползучести (малоцикловая усталость). Поэтому для условий ползучести и малоцикловой усталости принимают $\sigma_{\min} = 0$, $\Delta K = K_{\max}$, $\Delta\sigma = \sigma_{\max}$.

Начальную длину l_0 можно принять: равной нулю, если объект новый и нет других данных; по данным УЗК или измерительного контроля; равной 1...2,2 мм — размеру трещины, пропускаемому большинством методов НК.

Конечную длину трещины l_k , при которой происходит долом конструкции, определяют из условия

$$K_{Ic} \leq K_I = y\sigma_{\max} \sqrt{l_k \pi},$$

отсюда

$$l_k = \left(\frac{K_{Ic}}{\sqrt{\sigma_{\max}}} \right)^2 \frac{1}{\pi}.$$

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} определяют по результатам соответствия испытаний ГОСТ 25.506–85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении».

Пример. Имеется резервуар, работающий под давлением, максимальные напряжения в стенке $\sigma_{\max} = 300$ МПа, критический коэффициент интенсивности напряжений $K_{Ic} = 100$ МПа·м^{1/2}.

Тогда

$$l_k = \left(\frac{100}{1,12 \cdot 300} \right)^2 \frac{1}{\pi} = 0,028 \text{ м} = 28 \text{ мм}.$$

Предположим, что в сероводородной среде из-за охрупчивания K_{Ic} уменьшился до 50 МПа·м^{1/2}. Тогда

$$l_k = \left(\frac{50}{1,12 \cdot 300} \right)^2 \frac{1}{\pi} = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм}.$$

Раскрытие трещины, предшествующее полному разрушению, может привести к разгерметизации конструкции, что для технологического оборудования в большинстве случаев является недопустимым. Для обеспечения герметичности необходимо, чтобы длина трещины не превышала толщину стенки конструкции. Условие трещиностойкости по критерию «течь перед разрушением» может быть записано в виде

$$l_k \leq S n_e,$$

где S — толщина стенки элемента; n_e — коэффициент запаса по критическому размеру дефекта.

12.5. Оценка ресурса по коэрцитивной силе

Согласно представлениям энергетической теории прочности, каждый материал характеризуется своим значением удельной энергии разрушения. При этом считается, что удельная энергия разрушения не зависит от способа подвода энергии. Для оценки оста-

точного ресурса необходимо знать две величины: предельное значение энергии разрушения для данного материала и текущее значение поглощенной энергии. Одним из таких методов, позволяющих оценить величину поглощенной энергии, является *метод оценки по величине коэрцитивной силы*, относящийся к магнитному виду неразрушающего контроля. Установлено, что для ряда конструкционных сталей, относящихся к классу разупрочняемых, с увеличением энергии, затраченной на накопление дефектов и повреждений, одновременно растет и коэрцитивная сила, являющаяся энергетической характеристикой. Работы последних лет в области магнитного контроля напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса металлоконструкций различных объектов позволили установить тесную корреляционную связь (коэффициент корреляции $\geq 0,9$) зависимости изменения коэрцитивной силы H_c с механическими свойствами конструкционных сталей (углеродистых Ст3, Ст20, Ст65, малолегированных 09Г2С, 10ХСНД, 17Г1С и др.), с нагруженностью конструкций и накоплением ими повреждений*. Это объясняется единством природы намагничивания металла, упругопластической деформации, накопления повреждений и роста коэрцитивной силы.

Установлено, что запас энергии, затрачиваемой на накопление повреждений и разрушений, и соответствующая величина коэрцитивной силы H_c примерно одинаковы для исследованных марок конструкционных сталей как при статическом, так и при переменном, циклическом (усталостном) нагружении. Этот факт является экспериментальным подтверждением энергетической теории разрушения, позволяющей определить базовые параметры для контроля за состоянием металла магнитным методом по величине коэрцитивной силы. В зависимости от состояния стали различают:

H_c^0 — исходное значение коэрцитивной силы; в отожженном состоянии H_c^0 — минимальное для каждой марки стали;

H_c^T — значение силы, соответствующее уровню внутренних напряжений, равных пределу текучести стали σ_T ;

H_c^B — значение силы, соответствующее достижению предела статической прочности стали σ_B ;

$H_c^{уст}$ — значение силы, соответствующее достижению предела усталостной прочности.

Величины коэрцитивной силы для некоторых марок сталей в различных состояниях приведены в табл. 12.1. Порядок измерения коэрцитивной силы и соответствующая аппаратура рассмотрены в 7.7.

* См.: Попов Б.Е. и др. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением // Безопасность труда в промышленности. — М., 2001. — № 3. — С. 25 — 30.

Марка стали	Коэрцитивная сила, А/см			
	H_c^0	H_c^T	H_c^B	$H_c^{уст}$
Ст3	2,0	5,3	6,0	5,8
09Г2С	4,0	7,8	9,5	9,5
10ХСНД	5,0	11,5	14,5	13,5
20	4,5	10,5	13,5	13,0
ДС	5,0...6,0	8,0...8,5	10,0...11,0	9,5...10,5

В первом приближении остаточный ресурс может быть оценен отношением H_c/H_c^B . При приближении этого отношения к единице остаточный ресурс уменьшается до нуля. Более точно оценить остаточный ресурс можно по номограммам для соответствующей марки стали, приведенным в РД ИКЦ «КРАН» 009-99 «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением, при проведении экспертизы промышленной безопасности». Так, на рис. 12.4 приведены номограммы для контроля малоциклового усталости и остаточного ресурса конструкций из сталей ВСтЗсп5, 09Г2С, ДС. По вертикали номограмм откладывается число циклов нагружений N , по горизонтали — максимальное значение коэрцитивной силы металла контролируемого объекта H_c^{max} , А/см. В качестве примера оценим остаточный ресурс сосудов-воздухосборников I и II, результаты контроля которых приведены на рис. 7.14. В соответствии с номограммой для стали ВСтЗсп5 (см. рис. 12.4) воздухосборник II, максимальное значение коэрцитивной силы в котором составляет $H_c^{max} = 5,6$ А/см, находится в критическом режиме и его эксплуата-

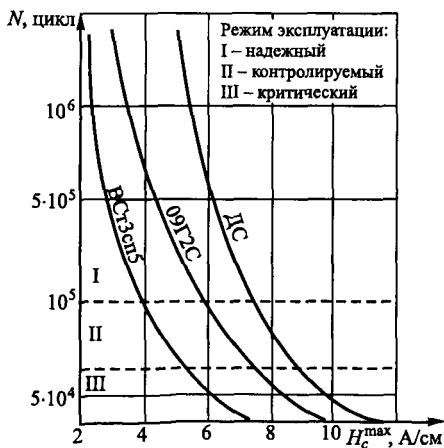


Рис. 12.4. Номограммы для контроля остаточного ресурса сосудов под давлением по величине коэрцитивной силы

ция должна быть прекращена. Воздухосборник I с $H_c^{\max} = 3,5$ А/см может работать и далее без ограничений по рабочим параметрам и остаточному ресурсу.

При наличии ретроспективных данных о величине коэрцитивной силы и соответствующей наработке чисел циклов нагружений между измерениями остаточный ресурс рассчитывается аналитически по следующей методике. Зависимость, связывающая текущее значение коэрцитивной силы H_c с ее исходным значением H_c^0 и соответствующим числом циклов нагружений N , аппроксимируется уравнением

$$H_c = H_c^0 + b \ln N,$$

где b — коэффициент, определяющий скорость роста H_c .

Выразив из последнего выражения N , получим

$$N = C_1 \exp(C_2 H_c),$$

где C_1 и C_2 — постоянные, определяемые из решения системы трех уравнений с тремя неизвестными (N_0 , C_1 и C_2), получаемые после подстановки результатов трех измерений коэрцитивной силы H_{ci} с интервалами ΔN_2 и ΔN_3 : (N_0, H_{c1}) , $(N_0 + \Delta N_2, H_{c2})$, $(N_0 + \Delta N_3, H_{c3})$; N_0 — число циклов нагружений, соответствующее первому измерению коэрцитивной силы H_{c1} .

Предельно допустимое число циклов нагружений получают из уравнения

$$N_{\text{доп}} = C_1 \exp(C_2 H_c^a).$$

Остаточный ресурс в числах циклов нагружения определяют из выражения

$$N_{\text{ост}} = N_{\text{доп}} - N.$$

Результаты измерения коэрцитивной силы могут быть использованы также для проверки соответствия фактического напряженного состояния допускаемым напряжениям по условию прочности или устойчивости, установленным соответствующими нормативными документами. Проверку выполняют по условию

$$H_c \leq H_c^{\text{кр}},$$

где $H_c^{\text{кр}}$ — критическая величина коэрцитивной силы, соответствующая допускаемому напряжению и определяемая по номограмме (см. рис. 7.11).

12.6. Оценка ресурса по состоянию изоляции

Состояние изоляционного покрытия является важнейшим фактором, определяющим ресурс оборудования, работающего в агрессивных средах. В первую очередь этот фактор актуален для стальных подземных газо- и нефтепроводов и хранилищ. Считается, что при нарушении целостности изоляции возникает интенсивная коррозия, приводящая к ускоренному истощению ресурса.

Методику оценки остаточного ресурса по состоянию изоляционного покрытия рассмотрим на примере подземных газопроводов (по РД 12-411-01 «Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов»). Оценка состояния изоляционного покрытия производится по следующим параметрам: внешнему виду покрытия (наличие, расположение, площадь сквозных повреждений), характеру покрытия (бугристость, наличие трещин, толщина по периметру, наличие обертки); адгезии (прочности соединения) с основным материалом, величина которой определяется по методикам, предусмотренным приложением Б ГОСТ Р 51164-98; величине переходного сопротивления между изоляцией и основным металлом.

Критериями предельного состояния изоляции являются ее механические свойства и электропроводимость, наличие отслоений и сквозных повреждений, прочность соединения изоляционного покрытия с металлом. Комплексным интегральным показателем состояния изоляционного покрытия, прогнозируя который можно определить его остаточный ресурс, является величина переходного сопротивления.

Переходным сопротивлением изоляционного покрытия называется электрическое сопротивление единицы площади покрытия в цепи труба—покрытие—электролит. Величина переходного сопротивления R определяется по методу, приведенному в 8.2, или с помощью мегомметра, например типа М1101М или другого с килоомной шкалой и напряжением 100 В. Одновременно определяется *удельное электрическое сопротивление* грунта в месте расположения диагностируемого участка газопровода.

Состояние изоляционного покрытия оценивается по фактическому переходному сопротивлению R_{ϕ} в сравнении с критическим (предельным) R_k значением конечного переходного сопротивления труба—грунт. Критическое (предельное) переходное сопротивление на диагностируемом участке газопровода вычисляется решением трансцендентного уравнения

$$R_k = \frac{\rho_r D}{2} \ln \left(\frac{\pi S (D - S) R_k}{D^2 H \cdot 0,4 \cdot 10^{-6}} \right),$$

где ρ_r — удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; D — наружный диаметр трубопровода, м; S — толщина стенки трубы, м;

H — глубина от поверхности земли до верхней образующей трубопровода, м.

Решать уравнение следует методом подбора значения R_k , обеспечивающего равенство левой и правой частей уравнения с точностью до 0,5. Если фактическое значение переходного сопротивления меньше критического ($R_\phi < R_k$), делается вывод о полной деградации изоляционного покрытия на данном участке газопровода. Если $2R_k \geq R_{cp} \geq R_k$, то покрытие находится на пределе защитных свойств. Если $R_\phi > 2R_k$ и имеется только пассивная защита газопровода, то рассчитывается остаточный срок службы изоляционного покрытия.

Расчет остаточного срока службы изоляционного покрытия по переходному сопротивлению проводится по формуле

$$T_{\text{ост}} = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{R_\phi - R_k}{R_k} \right),$$

где α — постоянная времени старения г:

$$\alpha = \frac{1}{T_\phi} \ln \left(\frac{R_0 - R_k}{R_\phi - R_k} \right),$$

где T_ϕ — фактическое время эксплуатации газопровода до начала диагностирования, г; R_0 — переходное сопротивление изоляционного покрытия на участке газопровода в момент завершения его строительства и сдачи в эксплуатацию, принимается по результатам приемосдаточных испытаний газопровода для данного участка либо используется минимальное нормативное значение по РД 12-411-01, принимаемое по табл. 12.2.

Таблица 12.2

Основа покрытия	Переходное сопротивление R_0 , Ом · м ²
Битумные мастики	$5 \cdot 10^4$
Полимерные рулонные материалы	10^5
Полиэтилен экструдированный	$3 \cdot 10^5$
Стеклоэмаль	10^3

При истечении расчетного остаточного срока службы $T_{\text{ост}}$ на продиагностированном участке газопровода ожидается снижение переходного сопротивления изоляционного покрытия за допустимые пределы и должно быть принято решение о дальнейших противокор-

розийных мероприятиях, в том числе с применением пассивной и активной электрохимической защиты. При экономической нецелесообразности дополнительных защитных мероприятий остаточный срок службы газопровода рассчитывается с учетом прогнозируемого уменьшения толщины стенок труб в результате интенсивной коррозии, обусловленной агрессивностью среды, исключая защитные свойства изоляции.

13. ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТИПОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Диагностирование оборудования различных типов осуществляется по определенным программам (алгоритмам). Индивидуальная программа технического диагностирования разрабатывается на основе типовой (см. 1.6) с учетом конструктивных особенностей конкретного оборудования. Ниже рассмотрены программы и особенности диагностирования некоторых типов основного технологического оборудования нефтегазовой промышленности.

13.1. Диагностирование буровых установок

Буровые установки представляют собой сложные технические системы, включающие комплекс машин, механизмов и сооружений. Техническое состояние буровой установки определяется состоянием ее составляющих, в том числе: основных грузоподъемных механизмов (лебедка, талевая система); металлоконструкций вышки; вспомогательных механизмов для выполнения спуско-подъемных операций на буровой площадке и приемных мостках; сосудов систем пневмооборудования установки, работающих под давлением; циркуляционных систем приготовления и подачи буровых растворов; комплекса приводов буровых роторов и другого оборудования.

Диагностирование (в НТД чаще используется термин «обследование») буровых установок производится с целью оценки их технического состояния как в период расчетного срока службы, так и выработавших свой расчетный ресурс.

При истечении нормативного срока эксплуатации обследование является обязательной процедурой и проводится с определенной периодичностью.

В соответствии с РД, разработанными АО «Уралмаш» и Волгоградским заводом буровой техники, предусматривают три вида обследования буровых установок с истекшим сроком эксплуатации: первичное, повторное и внеочередное.

Первичное обследование проводят по истечении нормативного срока эксплуатации, установленного заводом-изготовителем оборудования (обычно 7 лет с начала эксплуатации). Период, на который может быть продлен срок службы бурового оборудования, устанавливают исходя из требований нормативных документов и фактического состояния оборудования.

Повторное обследование проводят по истечении срока, установленного первичным обследованием. Количество повторных обследований не ограничивается. Срок до последующих обследований назначают не более трех лет. Возможность дальнейшей эксплуатации определяют общим состоянием бурового оборудования, экономическими показателями и затратами на ремонт.

Внеочередное обследование буровых установок проводят в следующих случаях:

- если в процессе эксплуатации наблюдается неоднократное появление дефекта в узлах металлоконструкций и механизмах;
- при наличии деформаций, возникающих в результате высоких динамических нагрузок, переподъема, пожара и т.п.;
- если буровая установка подлежит ремонту или реконструкции.

Обследованию подвергают буровые установки, находящиеся в рабочем состоянии и установленные на месте эксплуатации, в том числе буровые вышки, основание буровой установки, установленное на них оборудование, устройство для подъема вышек, а также электрооборудование и электроаппаратуру. Вышку можно обследовать как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Решение об этом принимает экспертная комиссия.

При проведении обследования выполняют следующие основные работы:

- ознакомление с технической эксплуатационной и ремонтной документацией буровой установки и ее анализ;
- внешний осмотр комплекса буровой установки, характеризующий визуально общее состояние металлоконструкций, механизмов, агрегатов, электро-, гидро- и пневмооборудования, проверку комплектности буровой установки;
- проверку состояния основных несущих элементов металлоконструкций с применением методов неразрушающего контроля;
- проверку состояния механизмов, агрегатов, канатов, канатно-блочных систем и других узлов и деталей с проведением необходимых измерений величины износа элементов механизмов;
- проверку состояния электрооборудования, электроаппаратуры, приборов безопасности, гидро- и пневмооборудования;
- отбор проб образцов (при необходимости) для химического анализа и проверки механических свойств несущих элементов металлоконструкций.

Необходимость определения химического состава и механических свойств металла может возникнуть в следующих случаях:

- в паспортах на конструкции буровой установки отсутствуют документы, удостоверяющие марку, химический состав и механические свойства металла на основные несущие и вспомогательные элементы металлоконструкций;
- температурный режим эксплуатации буровой установки, указанный в паспорте конструкций, не соответствует температурному режиму, указанному в документах (сертификатах и др.) для данных марок сталей;

- если в проверяемом элементе возникли трещины;
- когда необходимо определение фактического состояния металла в металлоконструкциях для оценки усталости металла.

После полного проведения обследования технического состояния буровой установки и устранения всех обнаруженных неисправностей (в случае принятия комиссией решения о необходимости испытаний) проводят контрольные статические испытания буровой установки, а также контрольные статические и динамические испытания вспомогательного грузоподъемного оборудования. Измерение обнаруженных при визуальном осмотре деформаций балок, ферм и других элементов металлоконструкций буровой установки выполняют с помощью натянутой струны, относительно которой измеряют расстояние до соответствующего элемента металлоконструкции. Струну натягивают параллельно элементу на некотором расстоянии, позволяющем обойти имеющиеся на конструкции выступы (кронштейны, фланцы и пр.).

Скручивание балок, ферм и других горизонтально расположенных конструкций определяют с помощью отвесов с замером расстояния от кромок верхнего и нижнего поясов до отвеса в 3–4 сечениях, равномерно расположенных по пролету между опор. Проверку перпендикулярности вертикально расположенных конструкций производят с помощью отвеса или с применением теодолита и реек.

При обнаружении дефектов или признаков их наличия на участках элементов металлоконструкций или сварных швов эти зоны очищают от грязи, краски, пыли, а также продуктов коррозии до металлического блеска. Для наиболее объективного получения информации о дефектах применяют неразрушающие методы контроля.

При выявлении трещин следует обратить внимание на направления развития трещин и их распространение на следующие элементы:

- стыковые соединения;
- фланцевые соединения;
- узлы примыкания элементов конструкций;
- стыки поясов;
- зоны резкого перехода сечений;
- сварные швы, расположенные поперек действующего в растянутых элементах усилия;
- зоны сближения сварных швов менее 50 мм;
- болтовые соединения.

Особое внимание обращают на места, подвергшиеся ранее ремонту с применением сварки, выполненной в процессе эксплуатации буровой установки. Контролируют состояние сварного шва и околошовную зону (шириной 20...30 мм), так как здесь возможно образование вторичных трещин из-за некачественных швов, полученных при определенных неудобствах выполнения сварочных работ.

Степень поражения металла коррозией определяют путем сравнения размеров толщин элементов металлоконструкции в пораженном коррозией месте с неповрежденным сечением элемента. При

этом контроль осуществляют или непосредственным измерением толщины открытого сечения элемента стандартным мерительным инструментом, или с помощью ультразвукового толщиномера для замкнутых сечений. Допускаемые минимальные толщины стенок не должны быть менее 80 % от их номинальной толщины.

При контроле болтовых соединений особое внимание обращают на наличие подкладок, зазоры по стыкам, затяжку болтов (100 % контроль), наличие предохраняющих против отвинчивания элементов: пружинных шайб, отгибных шайб, контргаяк, шплинтов и пр., степень поражения коррозией крепежных деталей.

Наличие трещин в болте устанавливается визуально или, при отсутствии внешних признаков трещин, средствами неразрушающего контроля. При обнаружении хотя бы одного болта с трещиной производится контроль всех болтов контролируемого соединения путем осмотра при последовательном их вывинчивании.

При обнаружении ослабленного болта производится его затяжка динамометрическим ключом или специальным ключом с контролем крутящего момента заданной величины. В каждом болтовом соединении несущих элементов металлоконструкции контролируется затяжка всех болтов.

Пальцы и оси, соединяющие элементы металлоконструкций, при выявлении повреждений фиксирующих элементов (ригелей, торцевых шайб, гаек и т.п.), что является свидетельством наличия осевых усилий в соединении, следует демонтировать и подвергнуть их и их посадочные места тщательному осмотру на предмет выявления дефектов.

Наряду с металлоконструкциями обследованию должны быть подвергнуты следующие основные объекты оборудования буровой установки:

- буровые лебедки, барабаны, валы, редукторы;
- тормозные устройства (ленточные, гидродинамические и электромагнитные тормоза, рукоятки тормозные);
- агрегаты талевой системы (кронблочные, талевые блоки, шкивы, крюки и специальные подвески, устройства для крепления неподвижной ветви талевого каната);
- талевые канаты;
- муфты (постоянные, сцепные, электромагнитные);
- цепные передачи (звездочки, цепи);
- карданные валы;
- вертлюги;
- буровые роторы с трансмиссией;
- манифольд;
- оборудование циркуляционной системы;
- комплекс дизель-гидравлического привода;
- дополнительные механизмы, обеспечивающие спуско-подъемные операции (ключи для свинчивания и развинчивания свечей, устройства для удаления колонны бурильных труб, пневмораскрепители, вспомогательные лебедки);
- буровые насосы;

- приводы буровых установок (механические, гидравлические и пневматические);
- тали вспомогательных грузоподъемных устройств;
- лебедки вспомогательные;
- компенсаторы монтажные;
- система пневмоуправления;
- сосуды, трубопроводы и т.п., работающие под давлением.

Обследование состояния механизмов, канатно-блочных систем грузозахватных приспособлений и других объектов оборудования включает следующие этапы:

- визуальный внешний осмотр всех без исключения агрегатов, узлов и деталей объектов оборудования и проверка их состояния без разборок;
- проверка состояния агрегатов и их элементов, связанная с разборкой и инструментальными измерениями дефектов и неисправностей;
- анализ обнаруженных неисправностей и составление заключения по результатам обследования.

После предварительного внешнего контроля агрегатов, узлов и доступных для осмотра открытых деталей производят вскрытие смотровых крышек или разборку механизмов для проверки их состояния и проведения инструментальных измерений обнаруженных неисправностей. Необходимость разборки соответствующего механизма дополнительно обуславливается также появлением повышенного шума или вибрации, повышенной температурой нагрева. Состояние подшипников наиболее эффективно оценивается по результатам контроля их вибрации.

При обследовании гидро- и пневмооборудования буровых установок руководствуются соответствующими инструкциями по эксплуатации предприятий-изготовителей. Перечисленное оборудование и трубопроводы при этом испытываются на функционирование.

Обследование состояния электрооборудования и электроаппаратуры включает следующие этапы:

- внешний осмотр электрооборудования и электроаппаратуры и проведение необходимых для безопасной работы проверок (измерений);
- проверка функциональной работоспособности электрооборудования и электроаппаратуры;
- разборка (при необходимости) с проведением электрических и механических измерений для подтверждения возможности нормальной эксплуатации электрооборудования и электроаппаратуры.

Измеряется величина сопротивления изоляции с целью обеспечения безопасности работы электрооборудования и обслуживающего персонала, а также сопротивления резисторов — с целью обеспечения соответствующих характеристик электродвигателей. Проверка величин растворов и провалов главных и вспомогательных контактов пускателей, контакторов и реле панелей управления осуществляется измерением величин растворов и провалов и сопоставлением их с

требуемыми значениями, указанными в инструкции по эксплуатации или других технических документах на проверяемую аппаратуру.

Степень износа главных и вспомогательных контактов, пускателей, реле и контакторов не должна превышать 50 % первоначальной толщины контакта.

Правильность установки и прилегания щеток проверяется визуально. При нормальном прилегании щетки должны иметь блестящую поверхность по всей площади соприкосновения с контактными кольцами.

По результатам внешнего осмотра и проведения необходимых измерений принимается решение о проверке работоспособности электрооборудования буровой установки под напряжением, а также проверке всех видов защиты и конечных ограничителей, предусмотренных паспортом буровой установки, в том числе нулевой, аварийной и максимальной защиты, конечных выключателей, ограничителей предельных нагрузок, блокировок от работы буровых насосов на закрытый (замерзший, забитый раствором) манифольд и т. п.

Проверка регулировки и настройки электроаппаратуры включает контроль величин параметров срабатывания максимальных и тепловых реле, реле времени и др., которые должны соответствовать данным, приведенным в таблицах на электрических принципиальных схемах.

Контроль работы основного и вспомогательного механизмов включает проверку:

- работоспособности механизмов;
- обеспечения механизмами доводочных (посадочных) скоростей;
- повышенной скорости подъема и спуска легких грузов;
- обеспечения ступенчатого и автоматического разгона и торможения;
- реверсирования электродвигателей;
- работы ограничителя грузоподъемности.

Контроль и регулировочные работы проводятся в соответствии с инструкцией по эксплуатации механизмов буровой установки.

После устранения всех неисправностей, обнаруженных в процессе обследования, и только в том случае, если имеются сомнения, что результаты обследования недостаточны для решения вопроса о дальнейшей эксплуатации буровой установки, проводятся ее испытания под нагрузкой.

Перед испытанием буровая вышка должна быть отцентрована. Смещение талевого системы относительно центра ротора свыше 50 мм не допускается. На кронблочной площадке вышки должны быть установлены в двух плоскостях и закреплены нивелирные рейки. Показывающий и контрольный индикаторы веса, оттарированные с учетом диаметра талевого каната и величины испытательной нагрузки, должны располагаться в удобном для наблюдения месте на вышке или основании. При проведении испытаний допускается использование тензометрических и других способов измерений, дающих достоверные результаты.

На территории буровой установки на расстоянии, превышающем высоту вышки на 10 м, устанавливаются наблюдательные пункты, снабженные теодолитами, нивелирами или другими оптическими приборами.

Измерения величины прогиба элементов в процессе испытания производятся нивелированием или визированием с помощью теодолита, а измерения отклонения наголовника вышки от вертикали — отвесом или теодолитом.

Общая схема крепления талевой системы к основанию вышки приведена на рис. 13.1.

Натяжение талевой системы осуществляется буровой лебедкой с помощью вспомогательного привода или при помощи трактора. Управление двигателем вспомогательного привода лебедки должно производиться с пульта, вынесенного за пределы вышки на расстояние, превышающее высоту вышки не менее чем на 10 м. Схема нагружения вышки приведена на рис. 13.2.

Соединение крюка или автоматического элеватора талевой системы буровой установки с опорными частями подвышечного основания осуществляется с помощью стропов и канатов (рис. 13.3). Длина канатной петли (рис. 13.4) принимается равной 30...45 м для вышек высотой до 41 м и 40...50 м для вышек высотой до 53 м, длина стропов 12...15 м.

В процессе испытания буровых установок испытательные нагрузки должны прикладываться плавно в три этапа. На каждом этапе испытания производятся замеры отклонения наголовника и усадка вышки в нагруженном состоянии и после снятия нагрузки.

Для различных этапов нагружения рекомендуются следующие значения испытательных нагрузок:

$$Q_{\text{ном1}} = 0,6 Q_{\text{доп}};$$

$$Q_{\text{ном2}} = 1,0 Q_{\text{доп}};$$

$$Q_{\text{ном3}} = 1,2 Q_{\text{доп}},$$

где $Q_{\text{доп}}$ — допускаемая паспортная нагрузка на крюке, кН.

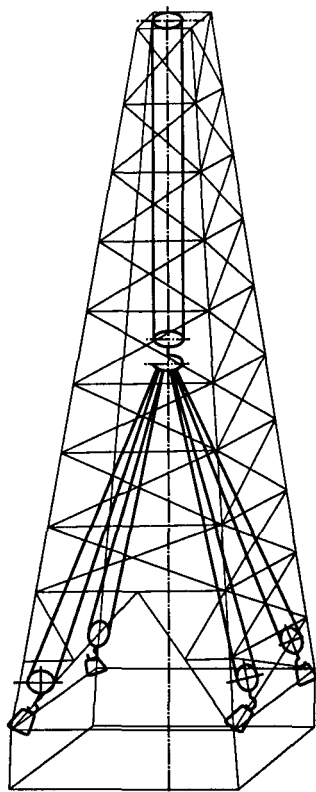


Рис. 13.1. Общая схема крепления талевой системы к основанию вышки

Рис. 13.2. Схема нагружения мачтовой вышки (блоки заякоривающей системы условно не показаны; лебедка и схема нагружения условно повернуты на 90°):

1 — лебедка; 2 — приспособление для крепления неподвижного конца каната

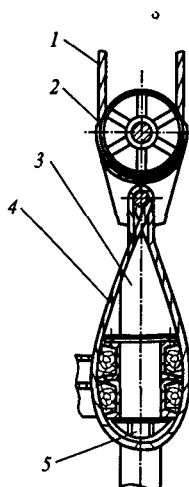
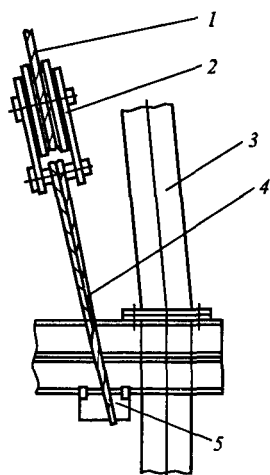
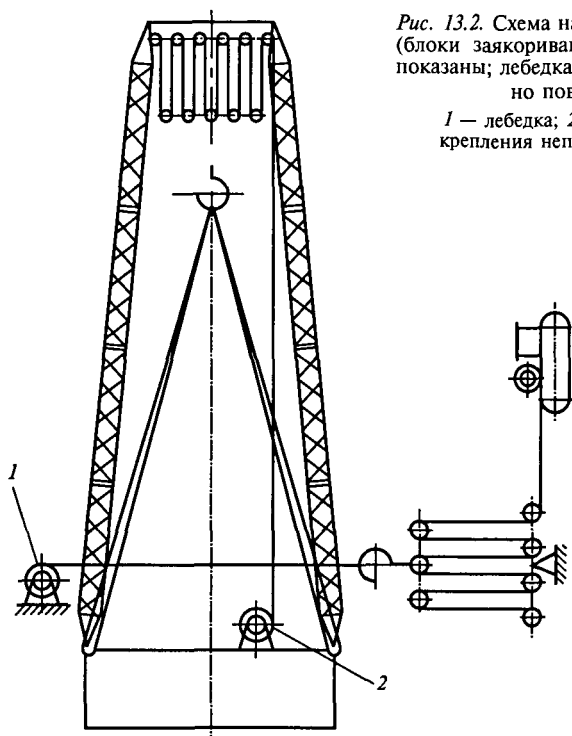


Рис. 13.3. Соединение крюка или автоматического элеватора талевой системы буровой установки с опорными частями подвышечного основания:

1 — канат заякоривающий;
2 — однороликовый блок;
3 — нога вышки; 4 — стропы;
5 — съемная прокладка

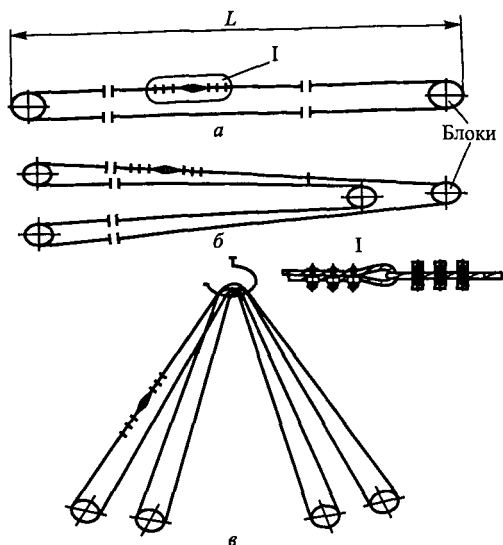


Рис. 13.4. Петля канатная:

а — общий вид; *б* — запасовка для двухопорной вышки;
в — то же для четырехопорной вышки

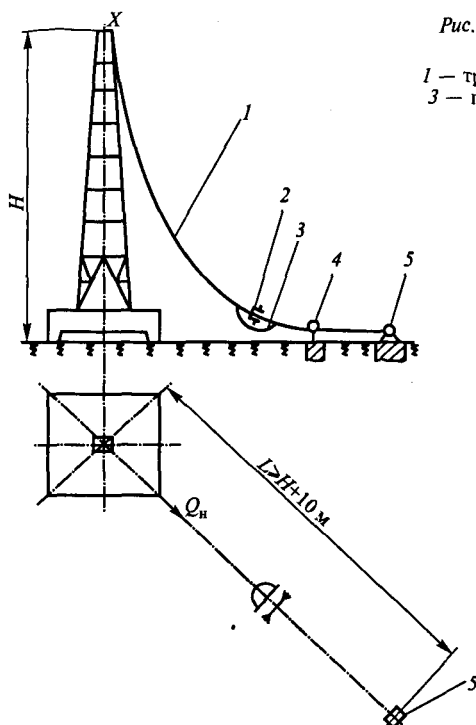
Все испытательные нагрузки должны выдерживаться в течение 10 мин. После каждого этапа вышка полностью разгружается. Остаточная деформация элементов вышки и несущих балок основания не допускается. Допускается остаточное проседание вершины вышки после снятия нагрузки для вышек высотой 41...42 м — 20 мм, высотой 53...54 м — 30 мм. Если остаточное проседание превышает допустимое, то комиссия выявляет причины и принимает решение о возможности дальнейшей эксплуатации буровой установки.

Существенным недостатком описанного силового метода испытаний вышек является высокая вероятность ее повреждения при нагрузке $Q_{\text{номз}} = 1,2Q_{\text{доп}}$. Кроме того, из-за высокой скорости нарастания нагрузки при использовании вспомогательного привода буровых лебедок вышки часто подвергаются нагрузке, превышающей допустимую испытательную. Для исключения этого недостатка Волгоградским заводом буровой техники разработана более безопасная технология проведения испытаний, предусматривающая использование специальной оснастки, включающей испытательный гидроцилиндр и автономную гидростанцию для его привода. Применение такой оснастки исключает возможность перегрузки и позволяет плавно регулировать скорость нагружения.

В качестве альтернативы испытаниям под нагрузкой служит разработанный ВНИИТБ совместно с МАИ им. С. Орджоникидзе способ проверки несущей способности буровых вышек, заключающийся

Рис. 13.5. Схема системы импульсного нагружения:

- 1 — трос-оттяжка; 2 — парашютный замок;
3 — предохранительная петля; 4 — ролик;
5 — лебедка



в определении изгибных характеристик испытываемых вышек на основе анализа их частотных характеристик с последующим расчетом реальной допустимой нагрузки на основе критерия динамической устойчивости. При этом частотные характеристики определяются экспериментально в процессе свободных изгибных колебаний испытываемой вышки, нагруженной до уровня, не превышающего допустимой эксплуатационной нагрузки.

Свободные изгибные колебания вышки создаются посредством ее импульсного нагружения с помощью канатной оттяжки, снабженной парашютным замком. Свободный конец оттяжки крепится к вершине вышки, а натяжение осуществляется с помощью вспомогательной лебедки (рис. 13.5). Импульсная нагрузка вышки возникает при раскрытии парашютного замка и сброса натяжения оттяжки. При статических испытаниях производят замеры упругих деформаций несущих конструкций грузоподъемного устройства.

Контрольное динамическое испытание грузоподъемного устройства производится грузом

$$Q_{ст} = 1,1Q_{ном},$$

где $Q_{ном}$ — номинальная (паспортная) грузоподъемность, кН.

Этот способ является неразрушающим, не требует дополнительных переоснащений вышки и может быть проведен над устьем буримой скважины. Вместе с тем для его реализации необходим специальный комплекс информационно-измерительной аппаратуры и высокая квалификация исполнителей.

Контрольным испытаниям под нагрузкой подвергают также консольно-поворотный кран, тали и другое грузоподъемное вспомогательное оборудование буровой вышки.

Контрольные статические испытания несущих конструкций грузоподъемного оборудования производятся грузом $Q_{ст} = 1,25Q_{ном}$.

При динамических испытаниях грузоподъемного оборудования вышки проверяют работоспособность механизмов, тормозов, электрооборудования, приборов и устройств безопасности.

Контрольные испытания вспомогательного грузоподъемного оборудования проводят, руководствуясь ПБ 10-382-00 «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов».

13.2. Диагностирование линейной части стальных газонефтепроводов и арматуры

Газонефтепроводы разделяют на промысловые и магистральные. Требования к проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации промысловых и магистральных газонефтепроводов, периодичности и объему их освидетельствования и технического диагностирования содержатся в различных отраслевых и ведомственных документах.

Газонефтепроводы представляют собой систему последовательно соединенных элементов: труб, трубных деталей, запорно-регулирующей арматуры, насосно-компрессорных станций (НКС) и др. Благодаря резервированию основных элементов НКС надежность газопровода меньше зависит от работоспособности НКС, чем от состояния линейной части (см. 1.4).

Нарушение работоспособности линейной части газонефтепроводов может происходить как вследствие нарушения технологии производства работ, так и из-за накопления дефектов элементами трубопровода в период эксплуатации. К технологическим причинам нарушения работоспособности линейной части относят гидратные и газовые пробки, засорения трубопроводов и др. Они выявляются методами функциональной (оперативной) диагностики и устраняются оперативным обслуживающим персоналом.

Основными видами дефектов, возникающих в процессе эксплуатации газонефтепроводов, являются: коррозия металла, эрозионный износ стенок, трещины в сварных швах и основном металле, нарушение защитных свойств изоляционных покрытий, изменение пространственного положения элементов трубопровода. Соотношение

различных дефектов определяется в основном климатическим районом расположения трубопровода, свойствами грунта (пучинистостью, просадочностью, набухаемостью и т. п.) в зоне его прокладки и наличием участков с высоким уровнем грунтовых вод. Так, для средней полосы типичными являются отказы трубопровода, вызванные развитием коррозии. Для трубопроводов, эксплуатируемых в северных районах России, характерным является усталостное разрушение труб, обусловленное необратимым изменением механических свойств и снижением характеристик трещиностойкости сварных соединений и основного металла. Усталостные трещины, развивающиеся при этом в результате циклических температурных напряжений и пульсации рабочего давления, возникают в зоне технологических дефектов сварных швов (непровар корня шва, поры, шлаки и т.д.) и далее переходят на основной металл труб. В связи с тем что стенки трубопроводов вследствие их упругой деформации аккумулируют большое количество энергии перекачиваемого продукта, возникновение усталостных трещин в условиях пониженных температур может вызвать квазихрупкие или хрупкие разрушения большой протяженности.

На каждый газонефтепровод на основании результатов анализа технической документации разрабатывается индивидуальная программа диагностирования, которая включает:

- карту-схему газонефтепровода с указанием потенциально опасных участков и отдельных элементов, которые в силу особенностей их конструкции или условий эксплуатации наиболее подвержены появлению повреждений и отказов;
- план обследования, включающий порядок и последовательность проведения диагностических работ, методы и аппаратуру, используемые в процессе диагностирования;
- меры безопасности при проведении диагностирования;
- методы обработки результатов диагностирования и порядок их представления.

Эффективным методом интегральной оценки состояния магистральных трубопроводов в труднодоступных местностях является аэрокосмическая съемка трасс с использованием инфракрасной, цветной, многозональной и других методов съемки. Такая съемка позволяет оценить состояние и динамику развития тех или иных геологических и биологических процессов на трассах (осыпи, обрушения, обводнение, осушение и др.), а также на сопутствующих инженерных сооружениях. Обязательным при диагностировании газонефтепроводов в доступных местах является визуальный и измерительный контроль. При этом помимо поверхностных дефектов определяют пространственные перемещения, характеризующие напряженное состояние линейной части.

Для организации и проведения контроля за положением и перемещениями линейной части наземных газонефтепроводов необходимо создать плановое и высотное геодезическое обоснование. Различают два вида обоснования: опорную геодезическую сеть и рабочее

обоснование. Пункты опорной геодезической сети закрепляют опорными реперами, неизменность пространственного положения которых обеспечивается на весь период эксплуатации объекта. Вертикальные перемещения определяют нивелированием от неподвижных реперов в середине пролета и на опорах на прямолинейных и компенсационных участках. Горизонтальные смещения трубопроводов измеряют обычно относительно опор по рискам. На подземных и наземных в насыпи участках продольные и поперечные смещения измеряют на углах поворота трассы и на прилегающих к ним прямолинейных участках. С этой целью на углах поворота устраивают шурфы для измерительной аппаратуры.

Индивидуальная программа диагностирования может также включать в себя: обследование (при наличии технико-экономической целесообразности) линейной части газонефтепроводов приборами внутритрубной диагностики; тепловизионный контроль отдельных элементов; акустико-эмиссионный контроль потенциально опасных участков газонефтепровода (переходы через железные и автомобильные дороги, овраги, водные преграды); приборный контроль параметров вибрации виброопасных участков трубопроводов и др. Для магистральных газонефтепроводов, имеющих большую протяженность, наиболее технологичным является проведение диагностики с помощью внутритрубных инспекционных приборов (ВИП). Технология внутритрубной диагностики регламентирована рядом нормативно-технических документов, наиболее подробным из которых является РД 153-39.4-035-03, разработанный центром технической диагностики «ДИАСКАН» акционерной компании «Транснефть».

Работы по внутритрубной диагностике в общем случае включают в себя:

- пропуск скребка-калибра для определения минимального проходного сечения трубопровода перед пропуском профилемера;
- пропуск шаблона-профилемера для участков первичного обследования, имеющих подкладные кольца, с целью предупреждения застревания и повреждения профилемера деформированными подкладными кольцами;
- пропуск профилемера для контроля проходного сечения трубопровода с целью предупреждения застревания и повреждения дефектоскопа и определения глубины вмятин;
- пропуск очистных скребков для очистки внутренней поверхности трубопровода от парафиносмолистых отложений, глиняных тампонов, а также удаления посторонних предметов;
- пропуск дефектоскопа.

Для проведения внутритрубной диагностики магистральный трубопровод должен отвечать следующим требованиям: все соединительные элементы и запорная арматура участка трубопровода должны быть равнопроходными с трубопроводом. Каждый участок диагностируемого магистрального трубопровода (в том числе лупинги и резервные нитки подводных переходов) должен быть оборудован ка-

(манометр P2), приоткрыв и закрыв задвижку V3. Полностью открывают задвижку V2, при этом задвижка V3 остается закрытой. Полностью открывают задвижку V3 и начинают приоткрывать задвижку V1. Прибор начинает движение из камеры в трубопровод. Прослеживают локатором (ЛК) прохождение прибора через выходную задвижку камеры, тройник и сигнализатор прохождения скребков (СКР). Как только прибор будет обнаружен локатором на первом маркерном пункте, полностью открывают задвижку V1 и изолируют камеру запуска, закрыв задвижки V2 и V3.

Все типы ВИП, используемых центром технической диагностики «ДИАСКАН», по техническим характеристикам позволяют проводить пропуски на участках магистрального трубопровода, имеющих подкладные кольца. Применяют следующие основные типы ВИП: очистные скребки СКР1, СКР1-1, СКР2, магнитные скребки СКР3, профилемеры и шаблоны-профилемеры, внутритрубные инспекционные приборы-дефектоскопы WM, MFL, CD

Очистные скребки СКР1 и СКР1-1 различного диаметра предназначены для очистки внутренней полости трубопровода от парафиносмолистых отложений, глиняных тампонов, а также для удаления посторонних предметов. Корпус скребка СКР1 представляет собой стальную полую конструкцию. Фланцы, приваренные в средней и задней частях корпуса, обеспечивают крепление на них двух ведущих, четырех чистящих дисков, разделенных прокладочными дисками малого диаметра, и одной или двух манжет (в зависимости от конструкции). Диски и манжеты изготовляют из высококачественных полиуретанов, стойких к истиранию. На заключительной стадии очистки, перед пропуском дефектоскопа, на передней и задней частях скребка вместо одного прокладочного устанавливают щеточный диск. Такой скребок называют скребком типа СКР1-1 (рис. 13.7). Специальная комбинация чистящих и щеточных дисков обеспечивает эффективное удаление отложений с внутренних стенок трубопроводов и из коррозионных углублений в стенках.

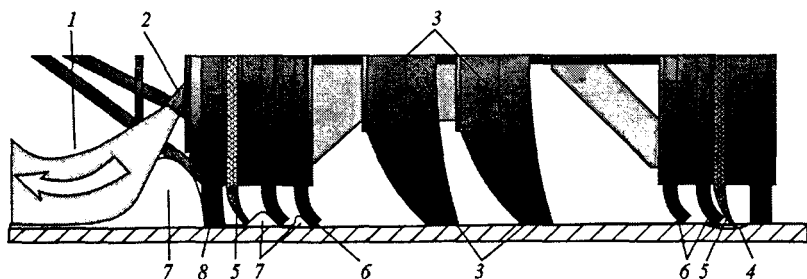


Рис. 13.7. Работа щеточного очистного скребка СКР1-1 с размывом отложений:

1 — струя продукта перекачки; 2 — сопло для размыва отложений; 3 — манжеты; 4 — раковина в стенке трубы; 5 — диск щеточный; 6 — диск чистящий; 7 — отложения; 8 — диск ведущий

На переднем торце скребка расположены байпасные отверстия, ось которых направлена под углом к стенке трубопровода. Они предназначены для размыва отложений, которые скребок счищает с внутренней поверхности трубопровода и толкает впереди себя. Байпасные отверстия могут закрываться заглушками-болтами. Иллюстрация работы скребков по очистке приведена на рис. 13.7. В задней части скребка в защитной раме может устанавливаться передатчик для скребка, являющийся генератором электромагнитных сигналов в диапазоне приема наземного локационного оборудования.

Скребок типа СКР2 (рис. 13.8) состоит из головной и хвостовой секций, соединенных карданным шарниром. Каждая секция содержит полый корпус и два блока полиуретановых дисков, расположенных в головной и хвостовой частях корпуса и предназначенных для очистки внутренней поверхности трубопровода. Блоки дисков состоят из набора дисков чистящих, ведущих, прокладочных и щеточных, разделенных прокладочными дисками, закрепленных на корпусе болтами.

На каждой секции между полиуретановыми дисками расположены щеточные диски, выполненные в виде прокладочного диска с запрессованными проволоочными пучками. Задние блоки дисков на головной и хвостовой секциях содержат чистящие и ведущие диски с байпасными отверстиями, прокладочные диски с пазами (только на хвостовой секции) и ведущие диски уменьшенного диаметра для формирования направленного потока перекачиваемого продукта. На головной секции скребка расположены шарнирно закрепленные рычаги со щетками с жесткой металлической щетиной, подпружиненные в направлении стенки трубы. На передней части головной секции установлен бампер и прокладка с пазами, образующие группу радиально направленных сопел. В задней части хвостовой секции расположен передатчик для скребка, закрытый защитной рамой.

Помещенный в очищаемый трубопровод скребок движется вместе с потоком перекачиваемого продукта. Очистка от парафиносо-

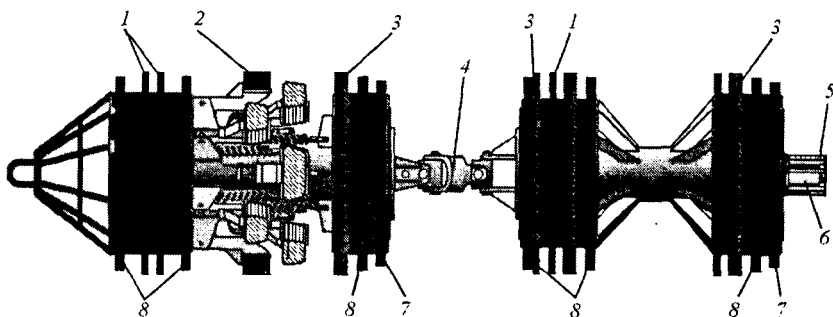


Рис. 13.8. Двухсекционный скребок СКР2:

1 — диски чистящие; 2 — подпружиненные щетки; 3 — диски щеточные; 4 — карданное соединение; 5 — бампер передатчика для скребка; 6 — передатчик для скребка (ПДС); 7 — диски перепускные; 8 — диски ведущие

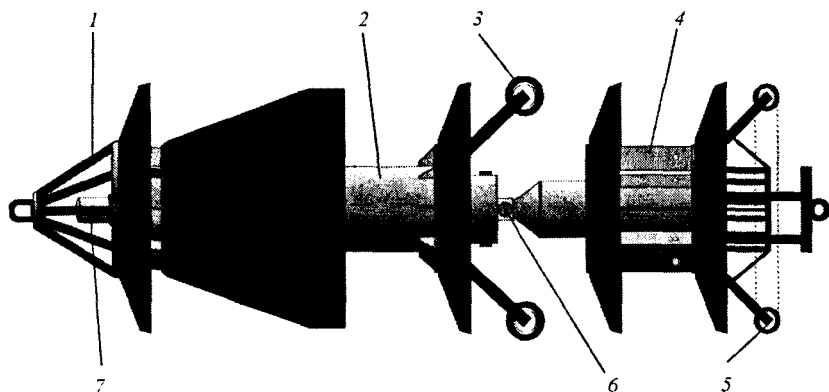


Рис. 13.9. Внутритрубный профилемер 40/48:

1 — бампер; 2 — секция электроники; 3 — одомер; 4 — измерительная секция;
5 — спайдер; 6 — измеритель поворота; 7 — антенна приемопередатчика

держат отложений осуществляется полиуретановыми чистящими дисками. Твердые отложения удаляются жесткими металлическими щетками, установленными на шарнирных рычагах. Отложения из коррозионных углублений удаляются щеточными дисками с гибкой металлической щетиной. Кольцевой канал между ведущим диском уменьшенного диаметра и стенкой трубопровода, отверстия в ведущих и чистящих дисках формируют поток перекачиваемого продукта, который через отверстия в корпусе скребка, а затем через группу радиально направленных сопел в передней части головной секции перетекает в зону трубопровода перед скребком, вынося с собой взвешенные частицы удаленных со стенок отложений. При этом поток жидкости, выходящий через сопла, размывает отложения на стенке трубопровода. Сформированный поток жидкости удаляет взвешенные отложения из рабочей зоны скребка и очищает металлические щетки от отложений.

Профилемер (рис. 13.9) является двухсекционным прибором, предназначенным для измерения внутреннего проходного сечения и радиусов отводов трубы, что необходимо для оценки возможности безопасного пропуска приборов-дефектоскопов. Выявляемые дефекты: вмятины, гофры, овальности, сужения глубиной более 2 мм (с вероятностью обнаружения 0,95). Погрешности измерения размеров устанавливаются в паспорте на каждый прибор. На второй секции установлены манжеты и измерительная система, состоящая из рычагов с колесами (так называемый «спайдер»), предназначенная для измерения размеров проходного сечения, вмятин, овальностей и других геометрических особенностей трубы. Секции связаны между собой карданным соединением, на котором смонтирована система измерения угла поворота (отвода) трубы, состоящая из неподвижного и подвижного «грибков».

Основным диагностическим ВИП являются внутритрубные дефектоскопы. В настоящее время в мире пока не существует универсального прибора для внутритрубной диагностики, который бы на основе сочетания различных физических методов неразрушающего контроля смог бы обнаружить все виды дефектов. Поэтому в центре технической диагностики «ДИАСКАН» выявление дефектов трубопроводов проводится поэтапно. На первом этапе с помощью профилемера «КАЛИПЕР» в трубопроводе выявляются диаметры внутреннего проходного сечения трубы, вмятины, гофры, овальности, сужения, радиусы отводов трубы и другие аномалии геометрии трубопровода. Затем внутритрубным ультразвуковым дефектоскопом «Ультраскан WM» определяются потери толщины стенки трубы из-за коррозии и эрозии, наличие неметаллических включений в стенках трубы и расслоений металла по толщине стенки. На третьем этапе с помощью магнитного дефектоскопа выявляются трещины и трещиноподобные дефекты в кольцевых сечениях трубы и, в первую очередь, в кольцевых сварных швах. На завершающем четвертом этапе осуществляется поиск трещин и трещиноподобных дефектов, расположенных вдоль оси трубы, с помощью внутритрубного ультразвукового дефектоскопа «Ультраскан CD».

Дефектоскоп ультразвуковой WM (рис. 13.10) предназначен для определения дефектов стенки трубы методом ультразвуковой толщинометрии радиально установленными в плоскости поперечного сечения трубы ультразвуковыми датчиками. Наличие и расположение дефекта в стенке трубы определяют по времени прихода ультразвуковых сигналов, отраженных от внутренней и наружной поверхности или неоднородности внутри стенки трубы, что позволяет определять кроме наружных и внутренних потерь металла различного рода несплошности в металле трубы, например: расслоения, шлаковые и иные включения.

Дефектоскоп WM снабжен системой измерения пройденного расстояния (одометрические колеса), системой приема—передачи

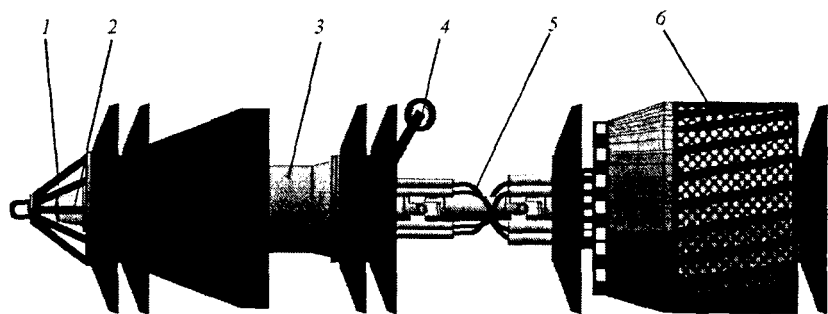


Рис. 13.10. Дефектоскоп внутритрубный ультразвуковой WM 40/48:

1 — бампер; 2 — антенна приемопередатчика; 3 — секция электроники; 4 — колесо одометра; 5 — карданное соединение; 6 — носитель ультразвуковых датчиков

электромагнитных сигналов низкой частоты, а также программируемой микропроцессорной системой управления (мастер-системой). Дефектоскоп WM состоит из секций — стальных герметичных корпусов (с расположенной внутри электроникой, накопителями информации и батареями) и носителя датчиков, связанных между собой с помощью карданных соединений и кабелей. Каждая секция и носитель датчиков снабжены полиуретановыми манжетами, предназначенными для центрования и обеспечения движения прибора по трубопроводу потоком перекачиваемого продукта. На каждом герметичном корпусе установлены также конические манжеты, служащие для предотвращения застревания прибора в тройниках, не оборудованных предохранительными решетками.

Носитель датчиков состоит из полиуретановых полозов, обеспечивающих постоянство расстояния от датчика до поверхности трубы. Полозы соединены между собой плоскими пружинами, благодаря которым они плотно прилегают к внутренней поверхности трубы. Для обеспечения омывания датчиков перекачиваемым продуктом от каждого полоза носителя датчиков отходит шланг к передней секции.

Ультразвуковой дефектоскоп CD отличается от дефектоскопа WM конструкцией ультразвуковых датчиков и предназначен для определения и измерения трещин и трещиноподобных дефектов ультразвуковыми датчиками, направленными под углом к плоскости поперечного сечения трубопровода. За счет этого дефектоскоп CD выявляет трещины, расположенные вдоль оси трубы, а также дефекты поперечных сварных швов (непровары, раковины, трещиноподобные дефекты).

Магнитные дефектоскопы MFL предназначены для контроля трубопроводов методом утечки магнитного потока в материале трубопровода и в сварных швах при движении дефектоскопа потоком перекачиваемого продукта. Пропуск дефектоскопов MFL по участкам с подкладными кольцами нецелесообразен вследствие искажений магнитного поля, вызываемых наличием подкладных колец и невозможностью получить информацию о наличии дефектов в кольцевых сварных швах. Для магнитных дефектоскопов MFL должна также дополнительно производиться очистка трубопровода от металлического мусора (остатков электродов, оборванных наплывов сварных швов и т. п.) пропуском магнитных очистных скребков типа СКРЗ.

Наиболее эффективным является использование комплекса магнитных дефектоскопов, имеющих продольную и поперечную схемы намагничивания относительно оси трубы. Это обусловлено тем, что поле рассеяния, регистрируемое на поверхности трубы с помощью соответствующих магнитных преобразователей (феррозондов или датчиков Холла), будет максимальным при наличии дефектов, ориентированных перпендикулярно магнитному потоку (см. 7.4), а магнитная дефектоскопия будет иметь наибольшую чувствительность. Поэтому применение такого комплекса позволяет выявить дефекты любой ориентации.

При невозможности контроля приборами внутритрубной диагностики (например, из-за отсутствия камер приема-пуска или других

конструктивных особенностей) газонефтепроводы подвергаются гидравлическим или пневматическим испытаниям на прочность и плотность. Как правило, испытания проводят гидравлическим способом с периодичностью не реже одного раза в восемь лет.

На каждый испытываемый участок газонефтепровода (или на весь газонефтепровод) разрабатывают проект производства работ, включающий проект организации испытаний и проект производства испытаний. Проект разрабатывается с учетом плана и профиля трассы, рабочих давлений, раскладки труб по трассе и технического состояния испытываемого участка. Технологическая схема проведения испытаний включает в себя технологические схемы трубопроводов с имеющейся и дополнительно устанавливаемой (при необходимости) для испытания арматурой, эпюры испытательных давлений по длине трубопровода, ситуационный план трассы в пределах охранной зоны, границы испытываемых участков и последовательность их испытаний, места расположения постов наблюдения, наполнительных и опрессовочных агрегатов, приборов для измерения давления и температуры, места размещения бригад аварийно-восстановительных служб, схему организации оперативной связи и иные необходимые сведения и данные.

Испытания газонефтепроводов проводят после очистки полостей трубопроводов от отложений и загрязнений с последующей промывкой или продувкой. Наибольшие сложности представляет собой очистка и промывка нефтепроводов. Очистку участков, имеющих одинаковое проходное сечение, осуществляют с помощью механических очистных устройств (скребков), вводимых в трубопровод с помощью камер приема пуска средств очистки и диагностики. В трубопроводах с неравнопроходным сечением для очистки применяют эластичные разделители переменного диаметра, шары-разделители или гель, вводимый в трубопровод через вантуз.

С целью повышения качества очистки полости трубопровода и уменьшения объема водонефтяной эмульсии на границе сред во-

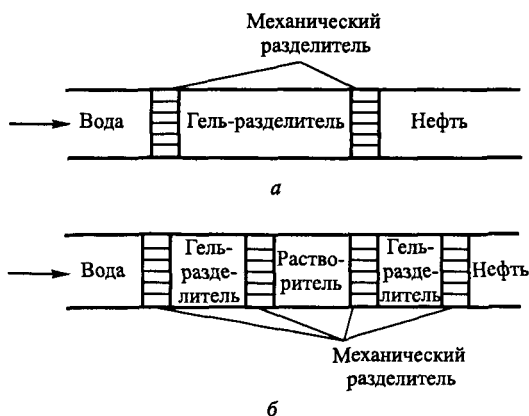


Рис. 13.11. Заполнение нефтепровода водой при его испытаниях с применением геля-разделителя (а); геля-разделителя и растворителя (б)

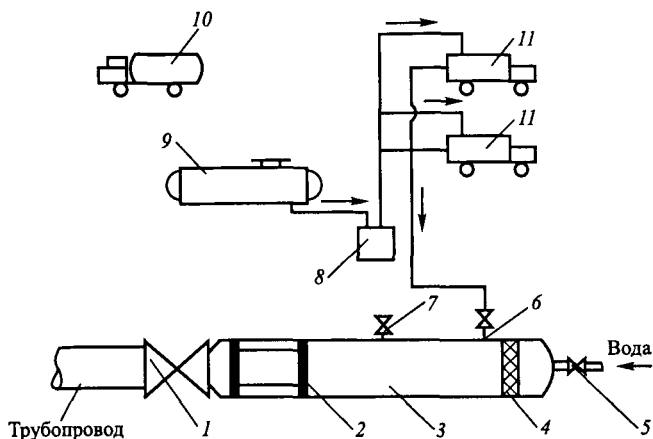


Рис. 13.12. Принципиальная схема формирования гелевой разделительной пробки: 1 — задвижка; 2 — механический скребок; 3 — камера пуска скребка; 4 — пенополиуретановый поршень; 5 — вантуз Ду-50 для подачи воды в камеру пуска скребка; 6 — вантуз Ду-50 с задвижкой и фланцем для присоединения насосных агрегатов; 7 — вантуз сброса воздуха Ду-12; 8 — емкость для приготовления геля; 9 — емкость для воды; 10 — транспортный автомобиль; 11 — насосный агрегат типа ЦА-320 (2 шт.)

да—нефть закачка воды должна проводиться с обязательным применением разделителей различных типов — механических и гелей. Для улучшения качества очистки полости трубопровода от нефти и парафиновых остатков применяют растворители. На рис. 13.11 представлена схема применения геля-разделителя, а на рис. 13.12 — принципиальная схема формирования гелевой разделительной пробки, разработанные ИПТЭР и применяемые в ОАО «АК «Транснефть»» при испытаниях магистральных нефтепроводов. Применение такой пробки при вытеснении нефти предотвращает образование водонефтяной эмульсии и одновременно очищает внутреннюю полость нефтепровода от рыхлых грязепарафиновых отложений.

Порядок образования гелевой пробки и перемещения ее в нефтепровод (см. рис. 13.12) следующий:

- размещается скребок 2 типа СКР-К или СКР-1 в камере пуска 3 за вантузом б;
- в камере пуска до вантуза б размещается поролоновая пробка 4;
- через вантуз б заполняется гелем из емкости пространство между скребком и поролоновой (пенополиуретановой) пробкой с помощью агрегата ЦА-320 (до полного прекращения выхода воздуха через вантуз 7);
- на вантузе б закрывается задвижка и продавливается водой, поступающей через вантуз 5, скребок, ГРП и поролоновую пробку за секущую задвижку в нефтепровод;
- закрывается секущая задвижка и устанавливается в камеру пуска замыкающий скребок, размещаемый до вантуза б;

- открывается секущая задвижка и через вантуз 6 закачивается в полость нефтепровода необходимое количество воды;
- закрывается задвижка на вантузе 6;
- водой, поступающей через вантуз 5, продавливается замыкающий скребок за секущую задвижку в нефтепровод.

Наиболее сложными для технического диагностирования являются подземные газонефтепроводы. Особенности определения их технического состояния рассмотрим на примере стальных подземных газопроводов.

Требования к техническому состоянию газопроводов установлены в утвержденных Госгортехнадзором РФ ПБ 12-368-00 «Правила безопасности в газовом хозяйстве». Предусмотрено, что оценка технического состояния осуществляется путем оперативной диагностики с периодичностью не реже одного раза в три месяца, а приборного технического обследования — не реже одного раза в пять лет.

Оперативную диагностику выполняют посредством обхода обслуживающим персоналом трассы газопровода. При этом выявляют утечки газа, всплытие или нарушение подземных участков газопровода, пучения, просадки, оползни, обрушения и эрозии грунта, размывы газопровода паводковыми или дождевыми водами и т. д. Фиксируются визуально обнаруживаемые дефекты видимых участков (перемещения газопроводов за пределы опор, наличие вибрации, сплющивания, недопустимого прогиба газопровода, просадки, изгиба и повреждения опор), проверяется состояние отключающих устройств и изолирующих фланцевых соединений, средств защиты от падения электропроводов, креплений и окраски газопроводов, сохранность устройств электрохимической защиты. Обход проводят не реже одного раза в три месяца.

При обходе подземных участков утечки газа на трассе газопровода определяются по внешним признакам и приборами — отбор и анализ проб на присутствие газа в колодцах и камерах инженерных подземных сооружений (коммуникаций), контрольных трубках, подвалах зданий, шахтах, коллекторах, подземных переходах, расположенных на расстоянии до 15 м по обе стороны от газопровода.

Приборное техническое диагностирование проводится с целью количественной оценки определяющих параметров газопроводов и установления их остаточного ресурса. Наибольшие сложности возникают при диагностировании подземных участков, что связано с трудностями доступа к ним и более интенсивным накоплением повреждений, обусловленным агрессивным воздействием грунта. Диагностирование подземных стальных трубопроводов, изготовленных из малоуглеродистых марок сталей, осуществляется в соответствии с введенным 15 сентября 2001 г. руководящим техническим документом Госгортехнадзора РФ РД 12-411-01 «Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов». РД устанавливают требования по проведению диагностирования газопроводов для транспортировки природного газа с избыточным давлением не более 1,2 МПа и сжиженного углеводородного газа с избыточным давлением

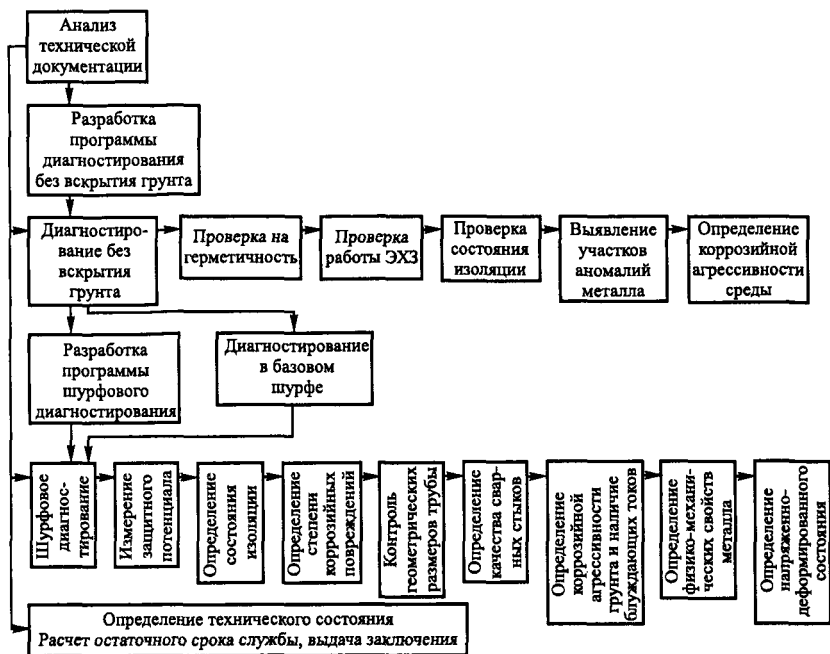


Рис. 13.13. Порядок диагностирования подземных газопроводов

не более 1,6 МПа. Последовательность выполнения диагностических работ приведена на схеме рис. 13.13.

Получить информацию о динамике изменения свойств металла и изоляционного покрытия на трассе подземных газопроводов, необходимую для оценки остаточного ресурса, можно только при наличии шурфов, что значительно повышает трудности диагностирования. Поэтому на первом этапе технического диагностирования максимум информации стремятся получить без вскрытия грунта.

Программа диагностирования без вскрытия грунта включает следующие разделы:

- проверка герметичности газопроводов в соответствии со СНиП 42-01-2002 «Газораспределительные системы». Подземный газопровод считается выдержавшим испытание на герметичность, если фактическое падение давления в период испытаний не превысит допустимое Δp , определяемое по формуле

$$\Delta p = \frac{20T}{d},$$

где d — внутренний диаметр газопровода, мм; T — продолжительность испытаний, $T = 24$ ч;

- проверка эффективности электрохимической защиты от коррозии путем измерения потенциалов на защищенном участке (в точке подключения установки электрохимической защиты и на границах создаваемой ею защитной зоны);

- проверка состояния изоляции (в том числе наличия сквозных повреждений) производится во всех местах, доступных для визуального контроля; на засыпанных участках газопровода — проверка сплошности изоляционного покрытия с помощью специальных приборов (АНПИ, КАОДИ, C-S_{can} и др.);

- выявление участков газопровода с аномалиями металла труб с помощью приборов, позволяющих дистанционно установить места коррозионных или иных повреждений труб, а также участки газопровода с местным повышением напряжений. Выявление таких участков производится методом бесконтактной магнитометрической диагностики (БМД) с помощью индикатора дефектов и напряжений (ИДН) или иного прибора, разрешенного для применения. Исследуемый параметр при этом — напряженность собственного магнитного поля газопровода и ее изменения (регистрирующий блок ИДН состоит из двух соосно расположенных феррозондовых датчиков магнитного поля);

- определение коррозионной активности грунта и наличия блуждающих токов на участках с наиболее неблагоприятными условиями по этому показателю.

По полученным результатам диагностирования без вскрытия грунта составляется акт и производится шурфовое диагностирование газопровода в базовом шурфе, устраиваемом в период строительства. Если на действующем газопроводе базовый шурф отсутствует, место базового шурфа выбирается в одном из мест обнаружения наиболее значительной аномалии металла или сквозного повреждения изоляции и однозначно в случае их совпадения (критерием, подтверждающим наличие мест аномалий, является всплеск параметров магнитного поля более чем на 20 % по сравнению с фоновым значением).

Помимо базового при необходимости разрабатывается программа закладки дополнительных шурфов. Основными критериями такой необходимости являются: утечка газа, совпадение показаний приборов проверки состояния изоляции с показаниями определения аномалий металла, результаты анализа технической документации и совпадение повреждений изоляционного покрытия с местами высокой агрессивности грунта, наличие блуждающих токов.

Программа шурфового диагностирования включает:

- определение толщины и внешнего вида изоляционного покрытия (расположение и размеры сквозных повреждений, наличие трещин, бугристость и др.), механической прочности, адгезии (прилипаемости) изоляционного покрытия к металлу трубы, величины переходного электрического сопротивления;

- определение величины коррозионных повреждений трубы, наличие вмятин, рисков и т.п., контроль наружного диаметра и толщины стенки при наличии коррозионных повреждений;

- определение вида и размеров дефектов в сварных швах, если они попали в зону шурфа и при осмотре обнаружены их отклонения от требований нормативных документов;

- определение коррозионной активности грунта и наличия блуждающих токов;

- определение фактических значений временного сопротивления $\sigma_{в.ф}$ и предела текучести $\sigma_{т.ф}$ при толщине стенки 5 мм; более 5 мм — определение ударной вязкости КСУ металла, параметров напряженно-деформированного состояния в кольцевом сечении.

Оценку технического состояния газопровода проводят путем сравнения фактических значений параметров технического состояния с предельно допустимыми значениями соответствующих определяющих параметров. При достижении предельного состояния принимают решение о ремонте газопровода или его демонтаже. При наличии запаса производят оценку остаточного ресурса по следующим определяющим параметрам:

- переходному сопротивлению изоляционного покрытия;
- изменению пластичности металла труб в результате старения;
- изменению ударной вязкости (трещиностойкости) в результате старения;

- величине напряженно-деформированного состояния при действии фронтальной (общей) коррозии металла;

- величине язвенной (питтинговой) коррозии металла.

Остаточный срок службы принимается наименьшим из рассчитанных по определяющим параметрам.

Трубопроводная арматура магистральных и промышленных газонефтепроводов относится к классу ремонтируемых, восстанавливаемых изделий с регламентируемой дисциплиной восстановления и назначенным ресурсом. Назначенный (средний) ресурс измеряется в часах и циклах «открыто—закрыто» с четко выраженным циклическим характером работы (запорная арматура: задвижки, клапаны, краны; защитная и предохранительная арматура: клапаны предохранительные, затворы и клапаны обратные и др.). Для арматуры, не имеющей четко выраженного циклического характера работы (регулирующая арматура), назначенный (средний) ресурс приводится в часах. В пределах установленных значений назначенных показателей должно быть обеспечено полное соответствие показателей безотказности арматуры требованиям и критериям, оговоренным в конструкторской и нормативно-технической документации.

Обследование технического состояния арматуры, находящейся в эксплуатации, производится индивидуально для каждой единицы арматуры по программе работ и включает следующие процедуры:

- визуальный и измерительный контроль;

- испытания на работоспособность.

В случае необходимости, с учетом результатов визуального и измерительного контроля и испытания на работоспособность, осуществляется также:

- разборка и ревизия внутренних полостей арматуры с дефектацией отдельных сборочных единиц и деталей;

- замер толщины стенок патрубков и корпусных деталей арматуры;
- контроль неразрушающими методами;
- контроль образцов материалов разрушающими методами или косвенная оценка механических характеристик материала по результатам контроля твердости;
- дополнительные испытания арматуры или ее отдельных комплектующих элементов, узлов и деталей;
- контроль приводных узлов.

Испытания на работоспособность включают:

- испытания изделия на плотность корпусных деталей;
- испытания на герметичность сальниковых и прокладочных уплотнений по отношению к внешней среде;
- испытания на герметичность в затворе (для запорной, предохранительной, обратной арматуры) в соответствии с паспортом на арматуру;
- проверку функционирования (совершение 2—3 циклов).

Испытания проводят, как правило, без демонтажа изделия, непосредственно на месте его установки. Работы по оценке технического состояния арматуры, связанные с необходимостью разборки или демонтажа изделия с места установки, проводят в момент плановой остановки трубопровода на планово-предупредительный, средний или капитальный ремонт.

При проведении визуального и измерительного контроля осматриваются как наружные, так и внутренние поверхности корпусных деталей, а также те детали, сборочные единицы и места, где вероятнее всего максимальный износ и возможны механические повреждения или усталостные явления, в том числе: застойные зоны, места скопления влаги и коррозионных продуктов, места изменения направления потоков, сварные швы и околошовные зоны (наличие подрезов, непроваров, свищей), зоны входных и выходных патрубков, резьбы втулок, штоков и маховиков (износ витков, сколы резьбы), хвостовики штоков и проушины дисков (клиньев) у задвижек, зоны уплотнения штоков (коробки сальников), уплотнительные поверхности узла затвора (седел, дисков, клиньев, золотников, плунжеров и т.д.) на наличие раковин, трещин, следов эрозии, коррозии, кавитационного износа; крепежные и соединительные детали арматуры (шпильки, болты, гайки), прокладки и поверхности уплотнения в местах сочленения сборочных единиц арматуры, внутренние поверхности корпусных деталей, подверженные кавитации, коррозии или эрозии; места возможной концентрации механических напряжений. Проверяются размеры изнашиваемых деталей и зазоры между подвижными сопрягаемыми деталями. Измеряются также толщины стенок патрубков, корпусов, размеры резьбы. Замер производится в местах, где возможно утонение вследствие коррозионного, эрозионного или кавитационного разрушений.

С учетом результатов визуального и измерительного контроля и ревизии внутренних полостей проводится дефектоскопия с примене-

нием методов неразрушающего контроля. Герметичность затвора проверяется АЭ течеискателем. Корпуса крупногабаритной трубопроводной арматуры контролируют с использованием комбинаций методов неразрушающего контроля: акустико-эмиссионного контроля, принимаемого в качестве основного; ультразвукового и капиллярного методов контроля как обязательных при обследовании акустически активных зон корпусов, обнаруженных при акустико-эмиссионном контроле; магнитопорошкового метода как альтернативного капиллярному при обследовании акустически активных зон корпусов; магнитометрического метода контроля (метода магнитной памяти) как альтернативного акустико-эмиссионному методу. Магнитометрический метод выбирается при отсутствии возможности обеспечения необходимого изменения внутреннего давления, требуемого при акустико-эмиссионном контроле, для определения линий или зон концентрации механических напряжений на поверхности корпуса.

Контроль осуществляется в первую очередь в местах резкого изменения толщины (сочленение патрубков—корпус), в подфланцевых зонах, в радиусных переходах, в местах пересечения или стыковки сварных швов, в зонах концентрации напряжений и других подобных местах. Контролю должна подвергаться арматура, длительно работающая в наиболее неблагоприятных климатических условиях, при максимальных рабочих параметрах и т.п. Рекомендуемые (ОАО «АК «Транснефть»») места для контроля толщины и наличия дефектов показаны, например, на рис. 13.14.

Обязательному поверочному расчету на прочность подлежат детали арматуры в случаях, если:

- число циклов нагружения (циклических изменений параметров рабочей среды и других воздействий), предусмотренное в конструкторской документации, может быть превышено в течение продлеваемого периода;
- выявлено утонение стенок или изменение размеров деталей, влияющее на их прочность, устойчивость, если не предусматривается их восстановление в процессе ремонта;
- размеры обнаруженных дефектов превышают допустимые, установленные НТД;
- выявлено изменение характеристик металла;
- выявлено отличие режимов эксплуатации от предусмотренных конструкторской документацией и расчетами на прочность в сторону ужесточения.

Расчеты производятся по действующей нормативно-технической документации. В результате расчета должно быть подтверждено соблюдение условий прочности на продлеваемый период с запасом прочности не ниже регламентированного уровня.

Критериями предельных состояний арматуры являются:

- начальная стадия нарушения цельности корпусных деталей и сильфонных сборок (возникновение трещин, разрушение отдельных слоев сильфона и т.п.);

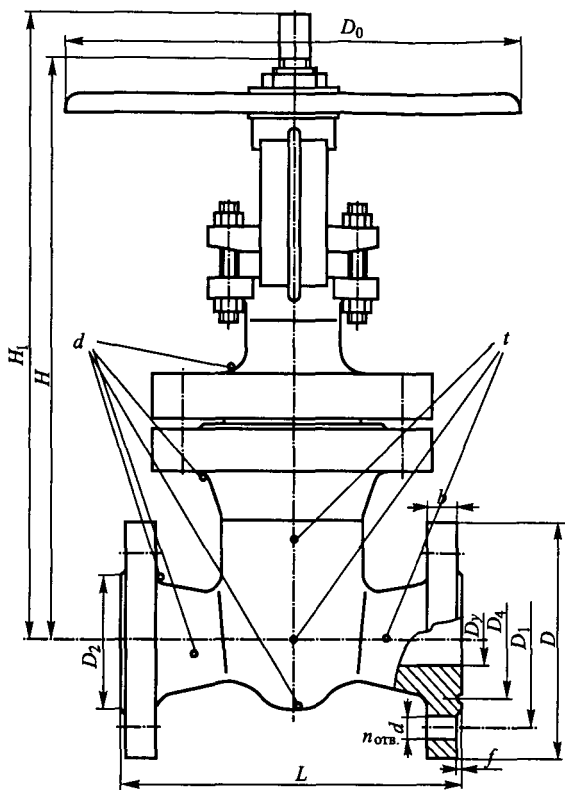


Рис. 13.14. Рекомендуемая схема мест замера контроля запорной арматуры:
 t — толщинометрия, d — дефектоскопия

- достижение геометрических размеров деталей (например, толщины стенок корпуса из-за механического износа, эрозийного, коррозионного и кавитационного разрушений) минимально допустимых значений;

- достижение количественных значений физико-механических характеристик металла основных деталей граничных значений, оговоренных нормативно-технической и конструкторской документацией.

Величину остаточного ресурса арматуры в общем случае определяют как разность между назначенным (средним) ресурсом, установленным в технической документации, и наработкой изделия на момент снятия его с трубопровода для проведения капитального ремонта. Величины назначенного (среднего) ресурса и наработки на момент обследования должны быть пересчитаны с учетом фактических значений рабочих параметров, скорости коррозии и (или) эрозии в процессе эксплуатации, результатов дополнительных испытаний.

13.3. Диагностирование сосудов и аппаратов, работающих под давлением

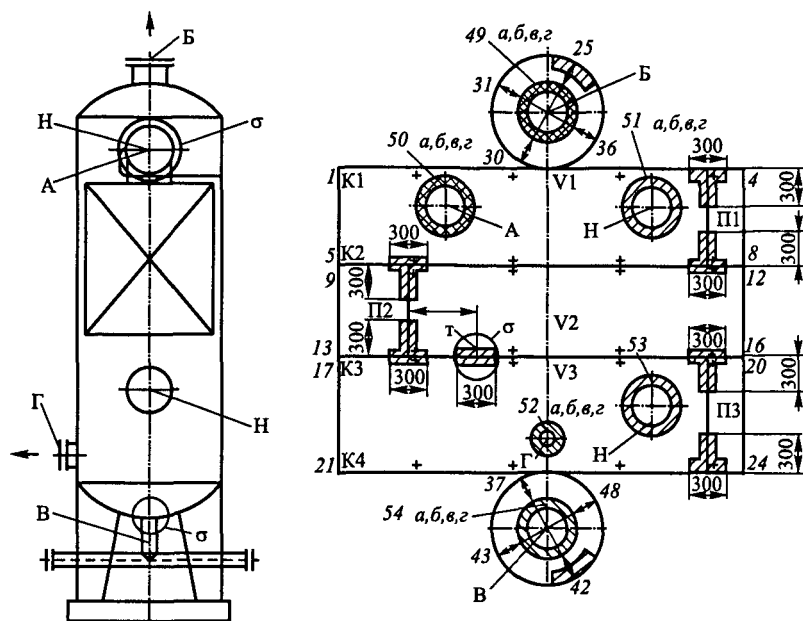
Требования к техническому состоянию сосудов и аппаратов установлены ПБ 03-576—03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением». Диагностика сосудов и аппаратов на объектах добычи нефти и газа осуществляется в соответствии с требованиями РД 26.260.16—2002 «Экспертное техническое диагностирование сосудов и аппаратов, работающих под давлением на объектах добычи и переработки газа, конденсата и нефти в северных районах Российской Федерации, и подземных газохранилищ». Технические требования и рекомендации применительно к сосудам и аппаратам, эксплуатируемым в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности приведены в РД 03-421—01 «Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов».

Перечисленные руководящие документы аккумулируют в себе последние достижения металловедения и механики разрушения. Распространяются на сосуды и аппараты, изготовленные из углеродистых, низколегированных и аустенитных сталей. РД 03-421—01, кроме того, распространяются на сосуды, аппараты и их элементы, работающие со средами, содержащими сероводород, вызывающими межкристаллитную коррозию металла, и на сосуды из двухслойной стали.

Диагностирование технического состояния осуществляется по программе, разрабатываемой на основе типовой программы (см. 1.5) на каждый сосуд или группу сосудов одной конструкции, работающих в одинаковых условиях (на одной «площадке» в одном цехе и т.п.) с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации, возможностей применения конкретного вида неразрушающего контроля. В ней приводится перечень потенциально опасных зон, объем и виды неразрушающего контроля. Зоны контроля изображаются на карте контроля с привязкой их месторасположения к ближайшим сварным швам или элементам сосуда с указанием размеров, обеспечивающих выполнение применяемых методов контроля (рис. 13.15).

Предприятие, эксплуатирующее сосуд в соответствии с программой обследования, обеспечивает подготовку сосуда к обследованию и безопасное проведение работ, а именно:

- отключение сосуда от всех коммуникаций, установку заглушек с хвостовиками, вскрытие сосуда и очистку его от отложений;
- удаление (снятие) частично или полностью наружной изоляции, препятствующей проведению контроля, зачистку зон контроля в соответствии с картой контроля;
- обеспечение освещением для проведения визуального осмотра внутри сосуда от источника тока не более 12 В и, при необходимости-



Условные обозначения:

- | | | | |
|--|---|--|---|
|  | — ультразвуковой контроль |  | — потенциально-опасные зоны |
|  | — магнитопорошковый контроль (капиллярный) |  | — зона контроля твердости |
|  | — магнитопорошковый (капиллярный) и ультразвуковой контроль |  | — схема замера твердости |
| | | + | — местоположение точки контроля толщины |

Рис. 13.15. Пример оформления эскиза сосуда и карты его контроля:

А — вход газа; Б — выход газа; В — дренаж; Г — выход конденсата; Н — люк; К1—К4 — кольцевые сварные швы; П1—П3 — продольные сварные швы; 1—48 — номера точек контроля толщины стенки обечайки и днища; (49—54) а, б, в, г — номера точек контроля толщины патрубков штуцеров (а — 0 ч., б — 3 ч., в — 6 ч., г — 9 ч.)

сти, электропитанием приборов и технических средств контроля в соответствии с действующими на объекте правилами техники безопасности;

- проведение анализа воздуха внутри сосуда на содержание вредных и взрывоопасных веществ, снабжение персонала средствами индивидуальной защиты органов дыхания, предупредительными плакатами и табличками установленного образца.

Работы по диагностике сосуда выполняют по наряду-допуску, оформляемому предприятием, эксплуатирующим сосуд. Предохранительные устройства сосуда, а также контрольно-измерительные приборы (КИП), установленные на щитах системы автоматизации (СА) и по месту, должны соответствовать рабочей (проектной) документации на СА сосуда. КИП должны быть метрологически поверены и иметь соответствующие клейма и отметки.

При выполнении визуального и измерительного контроля обращается особое внимание на оценку коррозионного и эрозионного износа в зонах раздела сред, в местах скопления воды или конденсата, в зонах резкого изменения траектории движения потока (например, на элементах корпуса или внутренних устройствах напротив входа продукта) и резкого изменения проходного сечения; наличие трещин в местах приварки патрубков, штуцеров и люков к корпусу сосуда, деталей крепления внутренних технологических устройств к корпусу сосуда и т.п.; трещин, образующихся в местах геометрической, температурной и структурной неоднородности (чаще всего в сварных соединениях); смещение или увод кромок или непрямолинейности соединяемых элементов; наличие вмятин или выпучин и других дефектов формы; отклонение сосуда колонного типа от вертикали; отрыв трубопроводов входа и выхода технологической среды от ближайших к сосуду фундаментов. Выявленные повреждения и дефекты изображаются на карте-контроле или эскизе с привязкой к ближайшим ориентирам. При необходимости в индивидуальную программу исследования вносят дополнения, предусматривающие применение различных видов неразрушающего контроля в зоне выявленных повреждений.

Сосуды и аппараты, изготовленные из углеродистых и малолегированных сталей, подвергаются в основном сплошной, язвенной, щелевой и точечной (питтинговой) коррозии. Оборудование, изготовленное из коррозионно-стойких (нержавеющих) сталей, может быть подвержено межкристаллитной коррозии (МКК), характеризующейся избирательным разрушением границ зерен металла и приводящей к резкому снижению его прочности и пластичности. МКК проявляется в зоне термического влияния сварных швов.

В некоторых средах возможно проявление ножевой коррозии по линии сплавления сварного шва, которая является разновидностью МКК. При наличии в технологической среде сопутствующих растворов хлоридов, щелочей, ряда кислот при температурах выше 40...50 °С нержавеющие стали подвержены коррозионному растрескиванию (КР). Наибольшая вероятность КР возникает в местах наибольших остаточных напряжений после сварки, штамповки, гибки и т.п. Для выявления склонности к МКК и КР в местах наибольших остаточных напряжений сосудов и аппаратов, изготовленных из нержавеющих аустенитных сталей, следует применять метод травления по ГОСТ 6032—89 и (или) методы неразрушающего контроля, позволяющие выявить поверхностные дефекты: вихретоковый, капиллярный, магнитопорошковый и др.

Неразрушающий контроль сосудов проводят:

- для более подробного исследования дефектов, обнаруженных визуально;
- для выявления ненаблюдаемых визуальных дефектов в сварных соединениях и потенциально опасных участках.

Неразрушающий контроль осуществляют методами ультразвуковой, магнитопорошковой, капиллярной дефектоскопии и др. Объем неразрушающего контроля определяется индивидуальной программой диагностирования. Сварные соединения сосудов, работающих при отрицательных температурах ниже минимально разрешенного уровня, подвергаются контролю ультразвуковым или радиационным методом в объеме 100 %.

На основании анализа технической документации, данных визуального и измерительного контроля, а также контроля элементов сосуда неразрушающими методами принимается решение о необходимости определения химического состава, структуры и механических свойств металла. Такая необходимость возникает, например, при диагностировании сосудов, установленных на открытом воздухе, которые в холодное время года подвергаются воздействию низких температур, в результате чего температура стенки может стать ниже, чем минимальная разрешенная температура применения стали, что может привести к снижению пластических свойств металла и опасности возникновения и развития хрупких трещин. Это относится в первую очередь к сосудам, изготовленным из углеродистых и некоторых низколегированных сталей. Эти работы выполняются обязательно при выявлении аномальных зон с наличием микротрещин или твердостью металла, выходящей за допускаемые пределы. По возможности работы выполняют без вырезки массивных образцов неразрушающим способом путем отбора малых проб (микропроб).

В сосудах и аппаратах, эксплуатирующихся в сероводородсодержащих средах (сероводород всегда сопутствует добыче нефти и газа), помимо общей коррозии может происходить коррозионное растрескивание и расслоение металла, вызванное водородом, образующимся в результате электрохимических процессов на поверхности стали при участии сероводорода, углекислого газа и воды. Сероводородное растрескивание и расслоение могут начаться внутри металла, вдалеке от поверхности. Сероводородному расслоению подвергаются в основном углеродистые и малолегированные стали с пределом прочности 300...800 МПа, в то время как сероводородное коррозионное растрескивание под напряжением более характерно для высокопрочных сталей.

Для обнаружения расслоений используют в основном ультразвуковую дефектоскопию и толщинометрию. Эти методы позволяют выявить дефекты на любой глубине в толще стенки аппарата. Надежность выявления дефектов (расслоений) обеспечивается сплошным сканированием поверхности.

Основной особенностью диагностирования сосудов и аппаратов, имеющих односторонний доступ к поверхности, является сложность

(или невозможность) проведения их визуального и приборного контроля в полном объеме; при этом для контроля недоступны именно те поверхности, появление дефектов на которых наиболее вероятно (наружная поверхность сосудов, заглубленных в грунт; внутренняя поверхность футерованных сосудов и аппаратов и др.). Характерным дефектом для таких объектов является коррозионное поражение металла из-за нарушений защитного покрытия. Поэтому одной из основных задач диагностирования является определение состояния защитного покрытия.

У сосудов, заглубленных в грунт, наружная поверхность обычно покрыта гидроизоляционным составом и недоступна для полного контроля. Частичный контроль состояния защитного покрытия может быть проведен путем рытья шурфов на глубину 1...2 м для осмотра. Основными видами контроля технического состояния изоляции и коррозионного состояния корпуса подземных сосудов являются внутренний осмотр и ультразвуковая толщинометрия, являющаяся в данной ситуации также и методом проверки качества изоляции.

При выявлении в результате проведенного контроля повреждений и дефектов производится оценка их соответствия нормам и критериям, приведенным в руководящих документах, а также выполняются проверочные расчеты на прочность и устойчивость. Эти расчеты стандартизованы и выполняются в соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

Чаще всего выполняется проверочный расчет по ГОСТ 14249-89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета» при обнаружении утонения стенок. Допускаемая минимальная толщина S_p по условию прочности без учета припуска на компенсацию коррозии определяется при этом по формулам:

для гладкой цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением:

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma] \phi_p - p};$$

для выпуклых эллиптических и полусферических днищ:

$$S_p = \frac{pR}{2[\sigma] \phi - 0,5p},$$

где D — внутренний диаметр оболочки; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение при расчетной температуре; ϕ_p — коэффициент прочности продольного шва оболочки; ϕ — коэффициент прочности сварных швов днища (в зависимости от расположения); R — радиус кривизны по внутренней поверхности в вершине днища сосуда.

При наличии трещиноподобных дефектов должен быть проведен расчет на прочность с учетом выявленных дефектов по моделям вязкого и хрупкого разрушения. При проведении расчетов по модели

вязкого разрушения условием обеспечения прочности является превышение допускаемых напряжений по сравнению с фактическими. Расчетная температура и допускаемые напряжения при этом определяются по ГОСТ 14249–89.

Сопротивление хрупкому разрушению в условиях растяжения для трещиноподобного дефекта считается обеспеченным при выполнении условия

$$K_i \leq [K_{Ic}].$$

где K_i — расчетное значение коэффициента интенсивности напряжений (см. 12.4); $[K_{Ic}]$ — допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений материала в исходном состоянии.

Расчет проводится для двух расчетных случаев: рабочих условий и гидравлических (пневматических) испытаний. В качестве расчетного давления при анализе рабочих условий принимается разрешенное давление. При гидравлическом (пневматическом) испытании — пробное давление по ПБ 03-576–03.

Оценка технического состояния сосуда проводится на основе анализа диагностической информации:

- проверки соответствия параметров технического состояния требованиям конструкторской (проектной) и нормативно-технической документации, предъявляемым к конструкции и материалам при изготовлении, монтаже, ремонте и эксплуатации;
- проверки соответствия параметров технического состояния, выявленных повреждений и дефектов критериям и нормам, установленным в руководящем документе;
- результатов проверочных расчетов на прочность.

Сосуд допускается к дальнейшей эксплуатации в установленном порядке, если в результате проведенного технического диагностирования определено, что при расчетных параметрах нагружения (давлении и температуре) он находится в исправном или работоспособном состоянии.

В случаях, когда нельзя оценить прочность сосуда по действующей нормативной документации, а также когда возникает необходимость получения дополнительной информации о несущей способности и остаточном ресурсе сосуда, проводят уточненные расчеты напряженно-деформированного состояния или его оценку экспериментальным путем (тензометрией, магнитным методом и др.).

Сосуд, в котором по результатам технического диагностирования выявлены дефекты, подлежащие устранению с применением сварки, после завершения ремонтно-восстановительных работ подвергается внеочередному гидравлическому (пневматическому) испытанию. Допускается проведение гидравлического (пневматического) испытания непосредственно после окончания технического диагностирования при условии, что до проведения планового гидравлического (пневматического) испытания остается меньше двух лет. Пневмати-

ческие испытания в обязательном порядке сопровождаются контролем акустико-эмиссионным методом.

Пробное давление при проведении испытаний определяют в соответствии с ПБ 03-576-03 по формуле

$$p_{\text{пр}} = Kp \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_T},$$

где K — коэффициент избыточного давления, $K = 1,5$ — для сосудов, изготовленных методом литья, $K = 1,25$ — для других способов изготовления; p — расчетное давление сосуда; $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]_T$ — допускаемые напряжения для материала сосуда при $T = 20^\circ\text{C}$ и расчетной температуре T_p .

Сосуд считается выдержавшим испытания, если в процессе нагружения не обнаружено падения давления, течи и отпотевания, трещин и других признаков разрыва металла, видимых остаточных деформаций, акустически активных дефектов (в том случае, когда при испытаниях осуществляется контроль методом АЭ).

Остаточный ресурс сосуда принимается минимальным по результатам расчета скорости коррозии (эрозии), циклической прочности, изменения механических характеристик материала. Назначаемый по результатам расчетов срок дальнейшей эксплуатации не должен при этом превышать предельную величину: если полученный в результате расчетов остаточный ресурс превышает 10 лет, то его следует принять равным 10 годам.

При продолжении эксплуатации сосуда устанавливается регламент контроля его технического состояния, предусматривающий проведение периодических освидетельствований, толщинометрию элементов и проведение испытаний пробным давлением.

В технически обоснованных случаях могут назначаться дополнительные виды контроля: например, при выявлении повышенной вибрации — периодическое измерение виброскорости на штуцерах и патрубках входа и выхода продукта в трех взаимно перпендикулярных направлениях, при выявлении деформации фундаментов — сезонные измерения деформации фундаментов и т.п.

13.4. Диагностирование установок для ремонта скважин

Установки для ремонта скважин (далее установки) изготавливаются в передвижном исполнении и представляют собой мачтовый подъемник, смонтированный на специальном шасси или на шасси базового серийного автомобиля. Техническое диагностирование установки регламентировано РД 08-195-98 «Инструкция по техническому диагностированию состояния передвижных установок для ре-

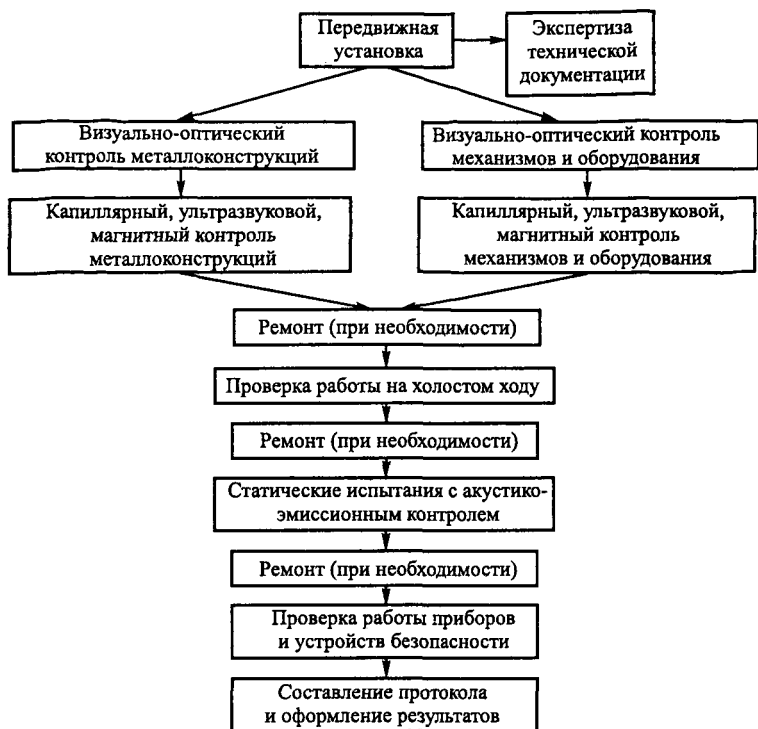


Рис. 13.16. Порядок технического диагностирования передвижных установок для ремонта скважин

монта скважин». Порядок диагностирования по РД 08-195–98 приведен на рис. 13.16.

Визуальный и измерительный контроль металлоконструкций, механизмов и оборудования выполняют в соответствии с типовыми картами осмотра установок. При необходимости применяют различные методы неразрушающего контроля. В качестве одного из основных предусматривается использование метода акустической эмиссии, позволяющего выявить в металлоконструкциях зарождающиеся и развивающиеся дефекты типа усталостных трещин. Акустико-эмиссионная диагностика осуществляется совместно со статическими испытаниями установки под нагрузкой.

К возможным характерным дефектам металлоконструкций, возникшим в процессе эксплуатации, относят:

- изгибы, смятия и другие виды деформаций, отклонения положения узлов от проектных;
- разрушение элементов вследствие коррозии;
- разрушение (вздутие) элементов замкнутого сечения вследствие скапливания и замерзания в них воды;

- образование трещин в сварных швах, основном металле и ослабление болтовых соединений;

- выработку (износ) шарнирных соединений.

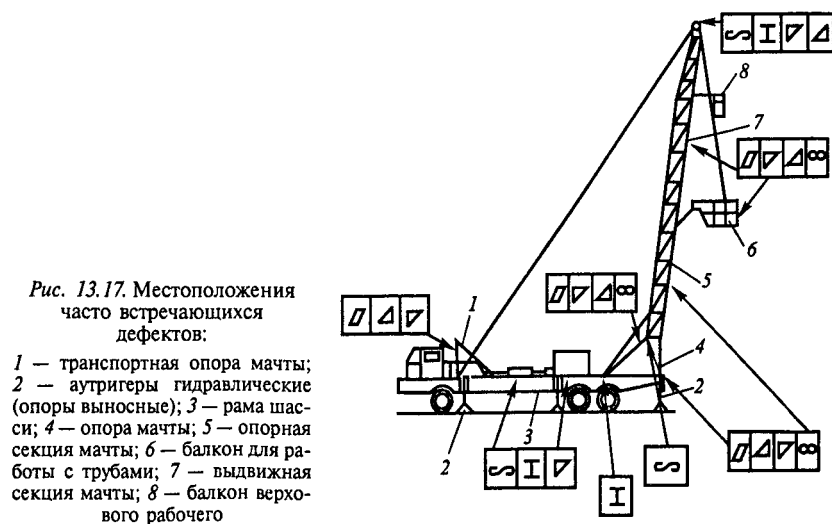
Измеряют размеры обнаруженных дефектов, устанавливают отклонения геометрических размеров и форм металлоконструкций от проектных. Полученные результаты сравнивают с допустимыми значениями и в случае их превышения вносят соответствующие данные в ведомость дефектов.

При проведении осмотра для фиксации выявленных дефектов применяют условные обозначения, приведенные в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Графическое обозначение	Наименование дефекта
∞	Вмятины, прогибы, искривления
∇	Трещины в сварных швах
Δ	Трещины в металле
I	Ослабление крепления
∩	Коррозия
∞	Износ
↗	Характерные места образования трещин

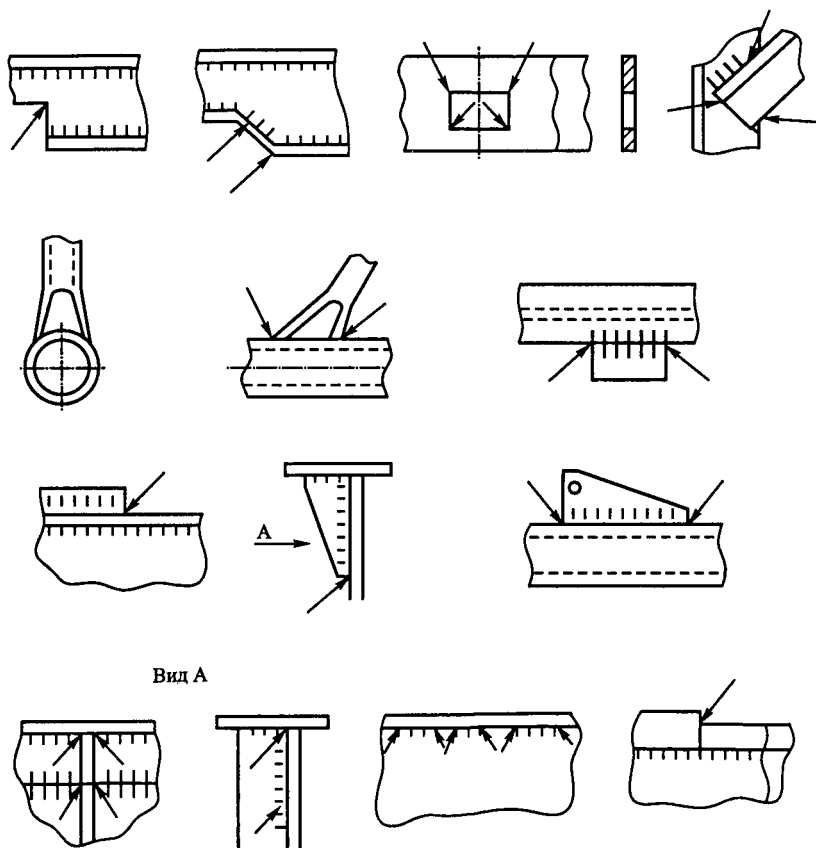
Виды и местоположения наиболее часто возникающих дефектов приведены на схеме установки на рис. 13.17.



Из числа перечисленных выше дефектов наиболее опасными являются трещины. Они чаще всего возникают в местах концентрации напряжений, вызываемых резким изменением сечения элементов. К типичным концентраторам напряжения относят:

- отверстия, вырезы и элементы с резким перепадом сечений;
- места окончания накладок, ребер, проушин, раскосов;
- места пересечения сварных швов, прерывистые швы;
- технологические дефекты сварных швов (подрезы, наплывы, незаваренные кратеры, резкие переходы от наплавленного металла к основному и др.), перепады в толщинах сваренных «встык» листов.

Типовые места в металлоконструкциях и установках, где возможно образование трещин, приведены на рис. 13.18.



Вид А

Рис. 13.18. Типовые места в металлоконструкциях, где возможно образование трещин

Оценку технического состояния всех механизмов, оборудования, приборов и устройств безопасности установок осуществляют путем их внешнего осмотра, проведения проверки на холостом ходу и под нагрузкой. При выявлении дефектов или при подозрении на их наличие узел или механизм необходимо разобрать, промыть и провести необходимые измерения и диагностику технического состояния его деталей методами неразрушающего контроля. К таким узлам относятся, например, редукторы, коробки передач, пневмо- и гидроаппаратура.

Контроль технического состояния электрооборудования осуществляют путем его осмотра, проверки комплектности, целостности, качества контактов, надежности крепления и т. п., а также проверкой сопротивления изоляции кабелей, проводов и электрических цепей электрооборудования.

Канаты, блоки, грузозахватные органы, приборы безопасности, кабину машиниста и другие узлы обследуют в соответствии с картой осмотра. Для обследования крюкоблоков, крюков, кронблоков, талевых блоков, элеваторов, штропов и вертлюгов применяют различные методы неразрушающего контроля. Предпочтительными являются ультразвуковой, капиллярный и магнитопорошковый методы.

На завершающем этапе диагностики проводят статическое испытание установки под нагрузкой, превышающей их номинальную грузоподъемность на 25 %. Испытание проводят при отсутствии дефектов, снижающих безопасность эксплуатации установки, а при их обнаружении — только после устранения этих дефектов. Перед проведением испытания мачта установки центрируется над испытательным грузом и закрепляется силовыми и ветровыми растяжками. Максимальное смещение оси талевого блока относительно оси приложения нагрузки не должно превышать 50 мм. В процессе испытаний проводится измерение отклонений мачты от вертикали (отвесом или теодолитом) и измерение величины прогиба элементов мачты (нивелиром). Остаточная деформация элементов мачты не допускается, а ее осадка должна удовлетворять требованиям, установленным РД 08-195-98.

13.5. Диагностирование вертикальных цилиндрических резервуаров для нефтепродуктов

Общие технические требования к конструкции, устройству, изготовлению, монтажу, эксплуатации и испытаниям резервуаров установлены ПБ 03-605-03 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов».

В зависимости от вместимости и места расположения резервуары подразделяют на три класса:

- класс I — особо опасные резервуары вместимостью 10 000 м³ и более, а также резервуары 5000 м³ и более, расположенные непосред-

ственно по берегам рек, крупных водоемов и в черте городской застройки;

- класс II — резервуары повышенной опасности вместимостью от 5000 до 10 000 м³;

- класс III — опасные резервуары вместимостью от 100 до 5000 м³.

Степень ответственности (опасности) учитывается при проектировании специальными требованиями к материалам, объемами контроля в рабочей документации, а также коэффициентом надежности по назначению при выполнении технических расчетов.

Диагностика резервуаров осуществляется в соответствии с РД 08-95-95 «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов». Положение распространяется на стальные сварные цилиндрические резервуары вместимостью 100 до 50 000 м³ следующих типов: со стационарной крышей, со стационарной крышей и понтоном, с плавающей крышей. Положение предусматривает порядок оценки технического состояния резервуаров по совокупности диагностических параметров с целью выработки рекомендаций об условиях их дальнейшей безопасной эксплуатации с вероятным остаточным ресурсом, сроках и уровнях последующих диагностических обследований либо о необходимости проведения ремонта или исключения их из эксплуатации. На основе и в дополнение к РД 08-95-95 некоторыми организациями разрабатываются свои ведомственные документы. Так, в ОАО «Акционерная компания трубопроводного транспорта нефтепродуктов «Транснефтепродукт» подготовлены согласованные с Госгортехнадзором РФ РД153-112-017-97 «Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров».

Система технического диагностирования вертикальных стальных резервуаров включает два уровня проведения работ:

- частичное техническое обследование резервуара с наружной стороны (без выведения его из эксплуатации один раз в пять лет);

- полное техническое обследование, требующее выведения резервуара из эксплуатации, его опорожнения, зачистки и дегазации (один раз в десять лет).

Зачистка и дегазация резервуаров является трудоемким процессом. Технология механизированной зачистки с обеспечением требований охраны труда, экологической и пожарной безопасности приведена в разработанной СКБ «Транснефтеавтоматика» Инструкции по зачистке резервуаров от остатков нефтепродуктов.

Проведение полного технического обследования в общем случае предусматривает выполнение следующих работ:

- ознакомление с эксплуатационно-технической документацией на резервуар, включающее анализ конструктивных особенностей резервуара; анализ условий эксплуатации; определение наиболее нагруженных, работающих в наиболее тяжелых и сложных условиях элементов резервуара;

- составление индивидуальной программы обследования;

- натурное обследование резервуара, включающее визуальный осмотр всех конструкций с внутренней и наружной сторон, в том числе визуальный осмотр понтона (плавающей крыши); измерение толщины поясов стенки, кровли, днища, понтона (плавающей крыши); контроль геометрической формы стенки, нивелирование днища; измерение расстояний между понтоном (плавающей крышей) и стенкой резервуара; проверку состояния основания и отмостки;

- контроль ультразвуковым, рентгенографическим и другими методами неразрушающего контроля, необходимость и объем проведения которого устанавливается по результатам визуального осмотра;

- определение при необходимости механических свойств материала и его структуры (методами неразрушающего контроля или лабораторного исследования вырезанных образцов);

- выбор расчетных схем и оценка остаточного ресурса работы металла с учетом скорости коррозии в местах уменьшения толщин элементов, изменения механических свойств металла или сварных соединений, объема и характера циклических нагружений; работы резервуара при отрицательных температурах (ниже 40 °С);

- разработка прогноза о возможности и условиях дальнейшей эксплуатации резервуара (в том числе периодичности и методах последующего контроля) с выдачей заключения.

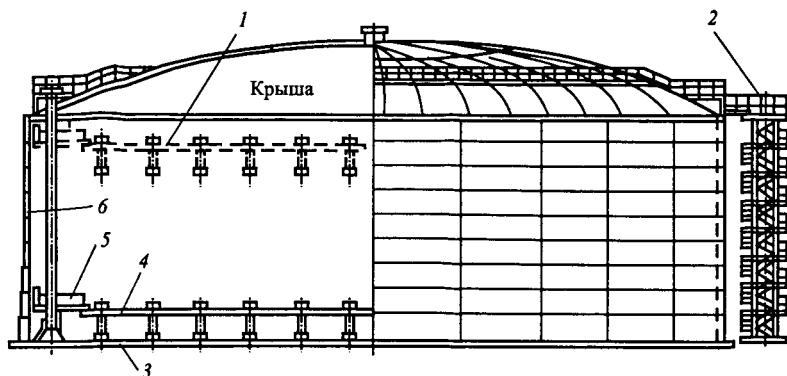
Целью первого этапа — изучения конструктивных особенностей, технологии изготовления и монтажа, а также условий эксплуатации резервуара — является определение наиболее напряженных зон в элементах конструкции, возможных механизмов образования дефектов в материале при эксплуатации и мест их локализации, а также составление (уточнение) программы технического диагностирования. Индивидуальная программа составляется на основе типовой программы и разрабатывается на каждый резервуар или на группу резервуаров с одинаковыми сроками эксплуатации и работающих в одинаковых условиях. В ней учитываются конкретные условия эксплуатации, имевшиеся ранее повреждения конструкции и выполненные работы по ремонту и реконструкции.

Конструктивные схемы некоторых типов резервуаров приведены на рис. 13.19 [16]. На конструктивной схеме резервуара отмечают элементы (участки) конструкции, которые представляются наиболее предрасположенными к разрушению. При этом первоочередное внимание следует уделять:

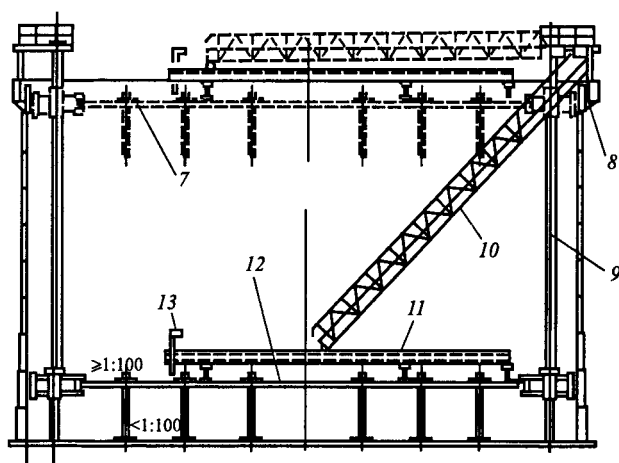
- сварным соединениям в вертикальных монтажных стыках стенки, в пересечениях вертикальных и горизонтальных швов в I — III поясах стенки (считая снизу), сварного шва между стенкой и днищем, сварных швов приварки люков и врезок в нижние пояса резервуаров;

- местам стенки у нижнего уторного шва, соединяющего стенку с днищем;

- местам присоединения трубопроводов, в том числе передающих вибрационные нагрузки;



a



б

Рис. 13.19. Конструктивные схемы резервуаров:

a — со стационарной крышей и понтоном; *б* — с плавающей крышей; 1 — верхнее положение понтона; 2 — шахтная лестница; 3 — днище резервуара; 4 — днище понтона; 5 — кольцо понтона; 6 — стенка резервуара; 7 — плавающая крыша в верхнем положении; 8 — верхнее кольцо жесткости (ходовая площадка); 9 — направляющая труба; 10 — катуная лестница; 11 — опорная балка; 12 — плавающая крыша в нижнем положении; 13 — стремянка

- участкам стенки, имеющим местные выпучины или вмятины и отклонения образующих резервуара от вертикали (в пределах или за пределами допусков);

- участкам конструкций, наиболее подверженных коррозии: нижнего пояса и двух верхних поясов стенки, днища, настила и несущих элементов крыши, понтонов и плавающих крыш.

Функциональная диагностика резервуаров, включающая контроль параметров их назначения и работоспособности, осуществля-

ется обслуживающим персоналом. Контролируются следующие параметры: давление в газовом пространстве; высота, состав и вязкость донного осадка; температура продукта; степень загазованности; наличие и величина электростатических зарядов; наличие и степень пожароопасности пиррофорных соединений; внешний вид изоляционного покрытия; глубина погружения плавающей крыши (понтон) и др. Результаты функциональной (оперативной) диагностики также учитываются и анализируются при проведении первого этапа технической диагностики.

Перед проведением натурного обследования резервуар опорожняют, дегазируют и очищают внутренние и наружные поверхности, подлежащие контролю. Удаление паров нефтепродуктов из резервуара осуществляется путем промывки его водными растворами с помощью специального оборудования для механизированной зачистки или пропаркой, а также последующей тщательной вентиляции. Работы по натурному обследованию проводятся по наряду-допуску после прохождения инструктажа по технике безопасности и противопожарной безопасности.

Практика показывает, что наибольшая частота отказов резервуаров происходит из-за появления сквозных трещин в сварных соединениях элементов днища, основания обечайки и уторных швах. Основными причинами появления таких трещин являются:

- коррозия днища и основания обечайки как снаружи, так и внутри, обусловленная воздействием подтоварной воды, атмосферными осадками и нарушением гидрофобного слоя основания;
- неравномерная просадка основания;
- дефекты сварных соединений из-за некачественной сварки или монтажа (рис. 13.20);
- снижение механических характеристик некоторых марок сталей с течением времени (деградация свойств). При визуальном осмотре обязательной проверке подлежит: состояние сварных соединений конструкций резервуаров в соответствии с требованиями проекта и СНиП 3.03.01—87, состояние основного металла стенки, днища, настила и несущих элементов кровли, понтон (плавающей крыши) с установлением наличия коррозионных повреждений, царапин, задиrow, трещин, прожогов, оплавлений, вырывов, расслоений, неметаллических включений, закатов и др. Коррозионные повреждения при этом подлежат разграничению по виду на равномерную коррозию (когда сплошная коррозия охватывает всю поверхность металла); ме-

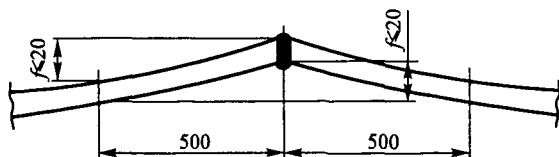


Рис. 13.20. Контроль угловатости монтажных швов

стную (при охвате отдельных участков поверхности); язвенную, точечную и пятнистую, в виде отдельных точечных и пятнистых язвенных поражений, в том числе сквозных;

- общие и местные деформации, вмятины и выпучины на конструкциях;
- размещение патрубков на стенке резервуаров по отношению к вертикальным и горизонтальным сварным соединениям в соответствии с требованиями проекта;
- состояние уплотнения между понтоном (плавающей крышей) и стенкой резервуара;
- вертикальность направляющих и опорных стоек, степень износа трущихся частей затвора;
- состояние сварных соединений и их соответствие нормативно-технической документации, наличие отпотин или трещин в сварных соединениях и основном металле;
- состояние изоляционных покрытий.

На резервуарах, изготовленных по рулонной технологии, особое внимание уделяют вертикальным монтажным швам, где на стыке соединения двух кромок рулона образуется угловатость, которая увеличивает концентрацию напряжений в монтажных швах и повышает вероятность образования в них трещин. За показатель угловатости принимают стрелу прогиба f в месте попадания внутрь от проектной образующей резервуара (см. рис. 13.20).

При контроле состояния изоляционных покрытий проверяют толщину изоляционного слоя, его адгезию к металлу, отсутствие намокания нефтепродуктом. При контроле теплоизолированных резервуаров оценивают величину теплопотерь изоляции. Повышенные теплопотери могут быть выявлены с помощью тепловизора или по косвенным признакам, например по увеличению скорости падения температуры нефтепродукта при его хранении в резервуаре. О качестве теплоизоляционного покрытия в целом судят по его теплосопротивлению, которое определяется расчетом. Теплосопротивление считается низким, если коэффициент теплопроводности покрытия окажется больше $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Все выявленные дефекты подлежат измерению по глубине залегания, протяженности и в масштабе наносятся на эскизы.

Объем работ по измерениям толщин устанавливают с учетом результатов визуального контроля. Во всех случаях измерения проводят в местах, наиболее пораженных коррозией. Толщина нижних трех поясов измеряется не менее чем по четырем диаметрально противоположным образующим в трех точках по высоте пояса (низ, середина, верх). Толщина остальных поясов измеряется не менее чем по одной образующей (вдоль шахтной лестницы) также в трех точках по высоте пояса. Толщина листов днища и настила кровли измеряется по двум взаимно перпендикулярным диаметральному направлениям; проводится не менее трех измерений на каждом месте. Результа-

ты измерения толщин используют при вычислении напряжений в металле, а также для определения скорости коррозии.

Для выявления действительной геометрической формы резервуара измеряется величина отклонений образующих стенки на уровне верха каждого пояса от вертикали. Измерения отклонений производятся либо с помощью отвеса путем прямых измерений, либо при помощи теодолита. Для определения мест наибольших деформаций и выявления напряженно-деформированного состояния стенки под нагрузкой измерения следует проводить дважды: на заполненном и пустом резервуарах.

Неравномерность осадки основания резервуара определяется путем нивелирования наружного контура днища в точках, отстоящих друг от друга не более чем на 6 м (как правило, в точках, соответствующих вертикальным швам нижнего пояса). Нивелирование осуществляется каждый раз в одних и тех же точках, отмеченных марками во время гидравлического испытания после строительства. Величины осадок определяют, сравнивая результаты нивелирования с постоянной абсолютной отметкой репера (грунтового или заложенного в стену здания или сооружения).

Исследование химического состава, механических свойств, структуры основного металла и сварных соединений выполняют в случае необходимости: для установления их соответствия требованиям нормативно-технических документов, а также для уточнения влияния эксплуатационных факторов на структуру и свойства металла.

Расчеты конструктивных элементов на прочность (в том числе с учетом сопротивления стали хрупкому разрушению) и устойчивость производят в случаях: отклонения фактических толщин от проектных; внесения при сооружении в конструкции изменений, не предусмотренных проектом; назначения сечений усиливающих элементов конструкций при разработке проектной документации на ремонт резервуара; оценки несущей способности конструкций с учетом деградации свойств металла, отклонения элементов резервуара от заданной геометрической формы и др.

Расчет на прочность и устойчивость выполняют в соответствии с ПБ 03-605-03.

Минимальная расчетная толщина стенки t_c в каждом поясе для условий эксплуатации рассчитывается по формуле

$$t_c = (gp(H - z)r)/(R_y\gamma_c),$$

где g — ускорение свободного падения в районе строительства; ρ — плотность продукта; H — высота налива продукта; z — расстояние от дна до нижней кромки пояса; r — радиус срединной поверхности пояса стенки резервуара; R_y — расчетное сопротивление материала; γ_c — коэффициент условий работы: $\gamma_c = 0,7$ для нижнего пояса, $\gamma_c = 0,8$ для всех остальных поясов.

Минимальная расчетная толщина стенки в каждом поясе для условий гидравлических испытаний рассчитывается по формуле

$$t_g = (g\rho_v(H_g - z)r)/(R_y\gamma_c),$$

где ρ_v — плотность используемой при гидроиспытаниях воды; H_g — высота налива воды при гидроиспытаниях; γ_c — коэффициент условий работы (при гидроиспытаниях для всех поясов $\gamma_c = 0,9$).

Проверочный расчет на прочность для каждого пояса стенки резервуара проводится по формуле

$$(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{0,5} = R_y\gamma_c/\gamma_n$$

или

$$\sigma_2 = R_y\gamma_c/\gamma_n,$$

где σ_1 — меридиональное напряжение; σ_2 — кольцевое напряжение; γ_n — коэффициент надежности по назначению, для резервуаров I класса $\gamma_n = 1,1$, II класса $\gamma_n = 1,05$, III класса $\gamma_n = 1,0$.

Расчет стенки резервуара на устойчивость выполняется с помощью проверки соотношения

$$\sigma_1/\sigma_{cr1} + \sigma_2/\sigma_{cr2} \leq 1,$$

где σ_{cr1} , σ_{cr2} — первое (меридиональное) и второе (кольцевое) критические напряжения.

При невыполнении этого условия для обеспечения устойчивости стенки можно увеличить толщину верхних поясов или установить промежуточные кольца жесткости, или то и другое вместе.

Фактические и критические меридиональные и кольцевые напряжения (σ_1 , σ_2 , σ_{cr1} и σ_{cr2}) рассчитываются по методике, приведенной в ПБ 03-605-03.

Расчеты на прочность и устойчивость при определении остаточного ресурса резервуаров должны выполняться с учетом эксплуатационной нагрузки (гидростатическое давление жидкости и избыточное давление газа, аварийный вакуум), концентрации напряжений, вызванных местными дефектами в сварных швах, отклонениями в геометрической форме стенки и другими дефектами, а также остаточной толщины стенки.

В газовом пространстве резервуаров со стационарной крышей без понтона при эксплуатации должно поддерживаться давление и вакуум. Избыточное давление в резервуаре создается при его наполнении, вакуум — при сливе. По величине избыточного давления (вакуума) судят о работоспособности дыхательной арматуры и герметичности крыши резервуара. При проверочном расчете на прочность и устойчивость выясняют способность выдерживать проектную или

назначенную по результатам диагностики величину давления (вакуума). Избыточное давление или вакуум для резервуаров с понтоном (плавающей крышей) принимается равным нулю.

Для резервуаров вместимостью более 10 000 м³, имеющих отклонения образующих от вертикали, превышающие допускаемые, и дефекты в зонах монтажных сварных соединений, испытывающих циклические нагружения более 250 полных циклов в год, специализированной организацией выполняются поверочные расчеты на малоцикловую усталость для определения расчетного ресурса.

Для резервуаров, эксплуатирующихся при пониженных температурах, необходимо выполнение поверочных расчетов узлов с учетом хрупкого разрушения согласно СНиП 11-23-81 «Нормы проектирования. Стальные конструкции».

При выявлении в результате обследования различных недопустимых дефектов производится определение объема и методов восстановительного ремонта резервуара с последующим контролем качества выполненных работ и испытанием под нагрузкой. Резервуары со стационарной и плавающей крышей подвергаются гидравлическому испытанию. Резервуары со стационарной крышей без понтона, эксплуатируемые с установленными на крыше дыхательными клапанами, испытываются на внутреннее избыточное давление и вакуум.

Гидравлическое испытание проводят наливом воды на проектный уровень залива продукта или до уровня контрольного отверстия, которое предусмотрено для ограничения высоты наполнения резервуара. Налив воды осуществляют ступенями по поясам с промежутками времени, необходимыми для выполнения контрольных осмотров состояния конструкций и сварных швов.

Гидравлическое испытание резервуаров с понтоном или плавающей крышей производят без уплотняющих затворов. По мере подъема и опускания понтона в процессе испытания производят: осмотр внутренней поверхности резервуара; измерение зазоров между бортиком или коробом понтона (плавающей крыши) и стенкой резервуара, а также между направляющими трубами и патрубками в понтоне (плавающей крыше); наблюдение за работой катучей лестницы, водоспуска и других конструкций.

При обнаружении течи из-под края днища или мокрых пятен на поверхности отмостки, появлении свищей, течей или трещин в стенке резервуара (независимо от величины дефекта) необходимо прекратить испытание, слить воду, установить и устранить причину течи.

Резервуар, залитый водой до верхней отметки, выдерживается под этой нагрузкой в течение обычно следующего времени: резервуар объемом до 20 000 м³ — не менее 24 ч; резервуар объемом свыше 20 000 м³ — не менее 72 ч. Резервуар считается выдержавшим испытание, если в течение указанного времени на поверхности стенки или по краям днища не появляются течи и если уровень воды не снижается. После окончания гидравлических испытаний, при зали-

том до проектной отметки водой резервуаре, производят замеры отклонений образующих от вертикали, замеры отклонений наружного контура днища для определения осадки основания (фундамента).

На основании результатов обследования определяется техническое состояние резервуара. В основу оценки технического состояния резервуара положены представления о возможных отказах, имеющих следующие причины: наличие в металле и сварных соединениях дефектов, возникших при изготовлении, монтаже, ремонте или эксплуатации, развитие которых может привести к разрушению элементов резервуара; изменения геометрических размеров и формы элементов (в результате пластической деформации, коррозионного износа и т.п.) по отношению к первоначальным формам и размерам, вызывающие превышение действующих в металле напряжений по сравнению с расчетными напряжениями; изменения структуры и механических свойств металла в процессе длительной эксплуатации, которые могут привести к снижению конструктивной прочности элементов резервуара (усталость при действии переменных и знакопеременных нагрузок, перегревы, действие чрезмерно высоких нагрузок и т.п.); нарушение герметичности листовых конструкций в результате коррозионных повреждений.

Эксплуатация резервуара не допускается, когда по условиям прочности и устойчивости, согласно ПБ 03-605-03 и СНиП 11-23-81 «Нормы проектирования. Стальные конструкции», при статических нагружениях отдельные элементы конструкции резервуара вследствие коррозионного износа, механических повреждений, снижения механических свойств металла не соответствуют расчетным эксплуатационным параметрам. В этом случае продление срока службы резервуара возможно при установлении пониженных эксплуатационных параметров (снижение уровня залива, уменьшение избыточного давления и вакуума) или после проведения комплексных мероприятий по ремонту и усилению металлических конструкций резервуара. В случае экономической или технической нецелесообразности ремонта дается заключение об исключении резервуара из эксплуатации.

Помимо металлоконструкций в процессе технической диагностики проводится проверка работоспособности устройств безопасности и технологического оборудования резервуаров: дыхательной и предохранительной аппаратуры; приборов контроля уровня, температуры и давления; приборов сигнализации и защиты; устройств для отбора пробы и подтоварной воды; противопожарного оборудования и устройств молниезащиты; приемо-раздаточных патрубков с запорной арматурой; устройств подогрева, зачистки и опорожнения; газоравнительных систем группы резервуаров со стационарными крышами (без понтонов) и другого вспомогательного оборудования. Это оборудование является заменяемым или легко ремонтируемым и остаточный ресурс резервуара не ограничивает. Перечень установленных устройств безопасности и технологического оборудования приводится в паспорте, который составляется на каждый резервуар.

13.6. Диагностирование насосно-компрессорного оборудования

Насосно-компрессорное оборудование относится к группе роторных машин, одним из основных элементов которых является ротор. Роторные машины состоят также из корпуса, валов, подшипников, соединительных муфт, уплотнений и других элементов. В общем случае наиболее слабым звеном, определяющим работоспособность роторной машины, может оказаться любой из перечисленных элементов. Техническое диагностирование роторных машин может производиться как без их разборки, так и с разборкой. Диагностика с разборкой дополнительно включает неразрушающий и измерительный контроль всех базовых узлов и деталей. Оперативный контроль технического состояния осуществляется обслуживающим персоналом по параметрическим и виброакустическим критериям (температуре, развиваемому давлению, величине подачи, потребляемой мощности, величине утечек, уровню шума, среднеквадратическому значению виброскорости и др.).

Наиболее перспективными для диагностирования роторных машин без их разборки являются методы вибродиагностики. В настоящее время большинство ответственных роторных машин оснащено контрольно-сигнальной виброаппаратурой (КСА), позволяющей регистрировать в контролируемых точках среднеквадратическое отклонение виброскорости в рабочей полосе частот 10...1000 Гц, автоматически включать предупредительную сигнализацию или отключать машины при достижении предельно допустимого уровня вибрации. При отсутствии КСА дежурный персонал производит измерения переносными виброметрами. Измерение виброскорости осуществляется в вертикальном направлении на каждой подшипниковой опоре горизонтальных роторов. У машин с вертикальными роторами виброскорость измеряется на упорных подшипниках также и в осевом направлении. Роторные машины большой единичной мощности (например, стационарные газотурбинные агрегаты ГТН-25 мощностью 26000 кВт) оснащаются системами вибромониторинга на основе многоканальной виброаппаратуры, позволяющими не только отслеживать изменение вибрационных параметров в процессе эксплуатации, но и осуществлять их анализ и на этой основе оценивать техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс машин.

Современные системы вибромониторинга, разрабатываемые рядом организаций (ВАСТ, ТНТ и др.), предусматривают наряду с методикой измерения и обработки вибросигналов использование специализированного программного обеспечения по диагностике оборудования различных типов. Применение таких программ обеспечивает автоматизированную диагностику неисправностей. Так, на рис 13.21 приведена схема точек измерения вибрации газоперекачивающего агрегата ГТН-10-4, оснащенного системой вибромонито-

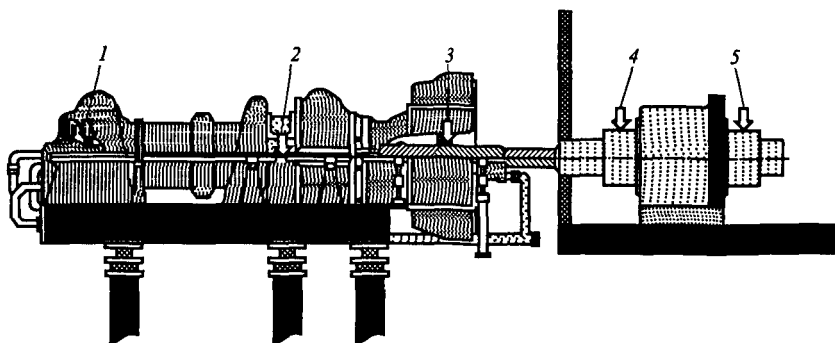


Рис. 13.21. Схема точек измерения вибрации агрегата ГТН-10-4:

1—5 — номера точек

ринга, разработанного отечественной фирмой «ИНКОТЕС» (г. Нижний Новгород). Программное обеспечение этой системы, поставляемое в составе автоматизированного рабочего места инженера-диагноста (АРМИД), позволяет автоматически диагностировать следующие неисправности агрегата ГТН-10-4:

- дисбаланс осевого компрессора ТВД;
- дисбаланс диска ротора ТВД;
- дисбалансы ротора ТНД и ротора нагнетателя;
- несоосность подшипников ротора ТВД;
- расцентровка роторов ТНД — нагнетателя;
- ослабление и исчезновение натяга по вкладышам опорно-упорных подшипников № 1 ТВД и № 4 ТНД и опорных подшипников № 2 ТВД и № 3 ТНД;
- увеличенный радиальный зазор опорно-упорных подшипников № 1 ТВД и № 4 ТНД и опорных подшипников № 2 ТВД и № 3 ТНД;
- коробление корпусов ТВД и ТНД при тепловых расширениях;
- торцевое биение дисков ТВД и ТНД;
- повышенные напряжения на рабочих лопатках 1—10-й ступеней осевого компрессора;
- трещины на выходном/входном трубопроводах и опорах технологической обвязки нагнетателя.

Типовая программа диагностирования роторных машин, не оснащенных системами вибромониторинга, включает следующие основные этапы:

1. Изучение и анализ технической и эксплуатационной документации и результатов оперативного контроля.

2. Визуальный осмотр машины и фундамента, проверка состояния соединительных муфт, уплотнений и других элементов, оценка функциональной работоспособности машины по параметрическим критериям и КПД, проверка работоспособности вспомогательного оборудования, систем управления и контроля, снятие контурной характеристики машины.

3. Разработка индивидуальной программы диагностирования и графика проведения работ с учетом конструктивных особенностей машины и условий ее эксплуатации.

4. Подключение в назначенных контрольных точках и тарировка вибродиагностической аппаратуры, регистрация параметров вибрации подшипников, корпуса, фундамента. Расшифровка и анализ спектральных составляющих вибросигналов.

5. Контроль основных узлов и деталей роторной машины неразрушающими методами (при необходимости).

6. Обследование состояния фундамента и строительных конструкций здания. Обследование проводится в том случае, если при предварительном осмотре установлено нарушение их целостности или выявлены изменения вибрационной характеристики системы «ротор—фундамент» (оценка состояния фундамента и строительных конструкций здания производится по соответствующим методикам).

7. Окончательная обработка и анализ результатов контроля, принятие решения: продолжение эксплуатации машины, вывод ее в ремонт или замена на новую.

Перед назначением контрольных точек снимают контурную характеристику роторной машины с целью выявления наиболее информативных точек, в которых вибросигнал имеет минимальные искажения и максимальную величину. Как правило, в качестве контрольных принимаются точки, располагающиеся на подшипниковых опорах и на элементах крепления машины к фундаменту. Расположение контрольных точек обязательно фиксируется, чтобы повторные измерения проводились в одном и том же месте. Ответственные роторные машины оснащаются стационарными креплениями датчиков в контрольных точках. Параметры вибрации на подшипниковых опорах таких машин измеряются в трех ортогональных направлениях: вертикальном, горизонтальном и осевом. Контрольные точки и направления измерения указываются на кинематической схеме контроля, пример которой приведен на рис. 13.22.

Если в процессе вибродиагностики выявляются нарушения вибрационной характеристики «роторная машина—фундамент», то дополнительно проводят обследование состояния оснований и фунда-

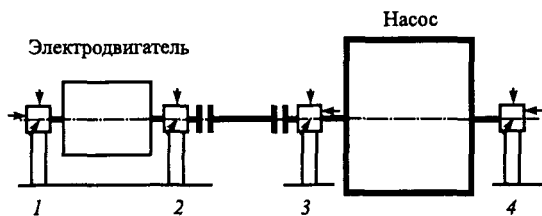


Рис. 13.22. Кинематическая схема контроля магистрального насоса:

1—4 — номера опор; → ↓ ~ точки установки датчиков

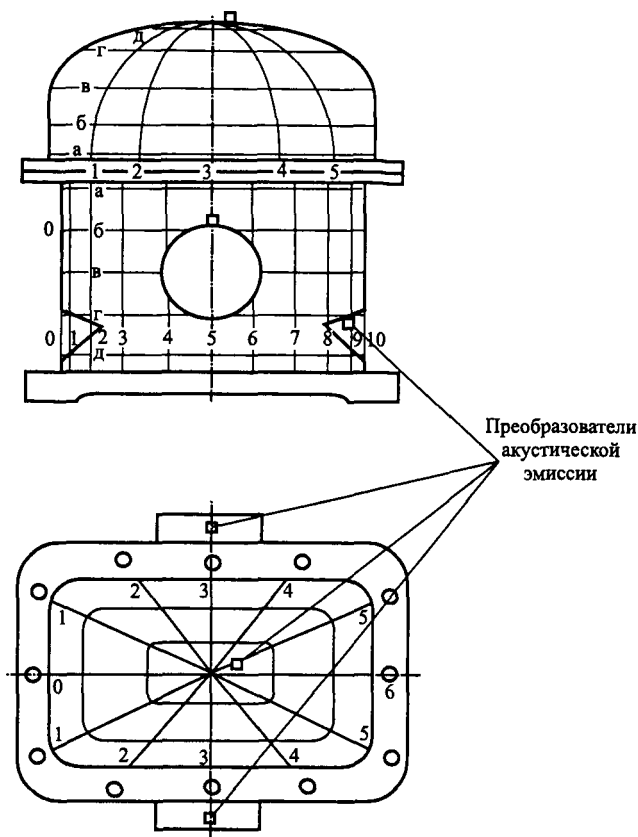


Рис. 13.23. Схема разметки корпуса при магнитометрическом методе контроля и установки преобразователей акустической эмиссии

ментов соответствующего оборудования. Эту работу выполняют с привлечением специалистов компетентных организаций.

При необходимости после проведения вибродиагностики производится разборка машины и оценка состояния всех основных узлов и деталей посредством неразрушающего и измерительного контроля. В первую очередь оценивается состояние корпусов машин, валов роторов, соединительных муфт и других быстроизнашивающихся деталей. Выявляется наличие дефектов в зоне концентраторов напряжений, измеряется износ трущихся поверхностей. Предельные значения износа при отбраковке элементов машины принимают по данным руководства по эксплуатации машины или технических условий на его ремонт. Диагностика корпусов роторных машин осуществляется магнитометрическим или акустико-эмиссионным методом НК. По результатам диагностирования мо-

жет проводиться дополнительное обследование корпуса другими методами НК.

Диагностирование корпуса магнитометрическим методом осуществляется в следующей последовательности: на корпус наносится разметка из вертикальных и горизонтальных линий, размещаемых с равным шагом. В качестве примера на рис 13.23 показана разметка корпуса магистрального насоса в соответствии с действующим в ОАО «АК «Транснефть» РД 153-39.4Р-124-02. Диагностирование осуществляется на неработающей машине независимо от величины остаточного внутреннего давления; производится путем сканирования поверхности датчиком прибора (индикатором концентрации напряжений) вдоль горизонтальных линий разметки. При пересечении датчика цифровой и алфавитной сеток фиксируются и записываются максимальные значения напряженности магнитного поля рассеяния со знаком плюс или минус. Скачкообразное изменение величины напряженности магнитного поля с одновременным изменением знака указывает на концентрацию остаточных напряжений и является признаком возможного дефекта.

Измерения толщин стенок и твердости металла корпусов машин осуществляются в местах с концентраторами напряжений или источников сигналов АЭ II, III, IV классов. Кроме этого измерения выполняются в зонах, где при визуальном контроле обнаружено уменьшение толщины стенок от абразивного, эрозионного или коррозионного факторов воздействия.

При неразрушающем контроле валов роторов с применением визуального и измерительного, ультразвукового, вихретокового и магнитопорошкового методов выявляются поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты: трещины, раковины, забоины, риски, следы фреттинга, недопустимые металлургические дефекты и другие нарушения сплошности материала. Контролируются поверхности вала под рабочим колесом и полумуфтой; в местах расположения галтелей, проточек, резьб, шпоночных пазов, переходов прямолинейного участка боковой стенки шпоночного паза к цилиндрическому участку и дна к боковой стенке.

При росте температуры подшипников и увеличении вибрации машины из-за возникающих дефектов в подшипниковых узлах машина выводится в ремонт и выполняется контроль технического состояния всех элементов подшипникового узла.

Обследование технического состояния соединительных муфт проводят при росте вибрации роторной машины из-за возникающих в муфтах дефектов или визуальном обнаружении неисправностей или их признаков. В первую очередь при этом контролируется точность центровки соединяемых валов. Далее проверяется плотность посадки полумуфт на валы, биение полумуфт, состояние зацепления, твердость зубьев втулок и обойм. При признаках поверхностных и подповерхностных дефектов в районе шпоночных пазов и в зубьях выполняют их дефектоскопический контроль вихретоковым, капиллярным, магнитопорошковым методами.

По результатам диагностирования и дефектоскопии материала элементов машины неразрушающими методами контроля проводится оценка их технического состояния, выполняются расчеты на прочность.

Для корпусов машин продление ресурса определяют на основе фактически полученных величин утонения стенок и свойств материала с учетом скорости коррозионно-эрозионного износа, малоцикловых нагружений, статистических данных о показателях надежности, интенсивности роста вибрации.

Продление ресурса подшипников, муфт, торцевых уплотнений осуществляется по результатам контроля их технического состояния при разборке машины, а также по скорости роста ее вибрации. Процедура прогнозирования остаточного ресурса роторной машины по изменению уровня вибрации осуществляется графоаналитическим методом с использованием результатов обследования объекта, статистических данных по надежности аналогичных типов машин и сводится к экстраполяции найденного тренда (скорости изменения вибрации) и определению момента его пересечения с линией предельного состояния машин данного типа.

Список литературы

1. *Алешин Н.П. и др.* Методы акустического контроля металлов. — М.: Машиностроение, 1989.
2. *Клюев В. В. и др.* Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003.
3. *Ермолов И.Н., Остапшин Н.Я.* Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов. — М.: Высшая школа, 1988.
4. *Сухоруков В.В. и др.* Неразрушающий контроль: в 5 кн. / Под ред. В.В. Сухорукова. — М.: Высшая школа, 1992.
5. *Баранов В.М. и др.* Акустический контроль и диагностика на предприятиях топливно-энергетического комплекса/ В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. — М.: Наука, 1998.
6. *Дубов А.А.* Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. — М.: Энергодиагностика, 2001.
7. *Кузнецов Н.С.* Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии. — М.: Машиностроение, 1998.
8. *Гриб В.В.* Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических производств. — М.: Изд-во ЦНИИТЭнефтехим, 2002.
9. *Генкин М.Д., Соколова А.Г.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов. — М.: Машиностроение, 1987.
10. *Скугорова Л.П.* Материалы для сооружения газонепфтепроводов и хранилищ. — М.: Недра, 1989.
11. *Якубович Н.А.* Оценка вибросостояния энергомеханического оборудования. — М.: Изд-во РАО «Газпром», 1997.
12. Оценка технического состояния и ресурса оборудования химических, газо- и нефтеперерабатывающих производств: сб. материалов школы-семинара 2002 г. — Волгоград: Афиша, 2003.
13. *Маслов Б.Г.* Дефектоскопия проникающими веществами. — М.: Высшая школа, 1991.
14. *Котляревский В.А., Штатов А.А., Ханухов Х.М.* Безопасность резервуаров и трубопроводов. — М.: Экономика и информатика, 2000.
15. *Баркова Н.А.* Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования. — СПб.: Изд. центр СПбМТУ, 2003.
16. Металлические конструкции: в 3 т. / Под ред. В.В. Горева. Т. 3: Специальные конструкции и сооружения. — М.: Высшая школа, 2002.
17. *Соснин Ф.Р. и др.* Неразрушающий контроль. Справочник: в 8 т. / Под ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003—2005.
18. *Гольдин А.С.* Вибрация роторных машин. — М.: Машиностроение, 1999.
19. Сборник руководящих материалов по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. — Л.: Недра, 1987.
20. *Жуков В.Г. и др.* Определения износа вантовых канатов порталных и башенных кранов в местах их заделки в муфты // Безопасность труда в промышленности. — М., 2002. — № 5.

Оглавление

Предисловие	3
1. Задачи, системы и типовая программа технической диагностики	4
1.1. Цель и задачи технической диагностики.	4
1.2. Виды дефектов, качество и надежность машин.	5
1.3. Восстановление работоспособности оборудования.	10
1.4. Виды состояния оборудования, системы технической диагностики	13
1.5. Типовая программа технического диагностирования.	19
1.6. Виды неразрушающего контроля, его стандартизация и метрологическое обеспечение.	22
2. Методы вибрационной диагностики	27
2.1. Сущность вибродиагностики и ее основные понятия	27
2.2. Средства контроля и обработки вибросигналов	34
2.3. Виброактивность роторов	37
2.4. Виброактивность подшипников и их диагностика	42
2.5. Виброактивность зубчатых передач и трубопроводов.	46
2.6. Вибродиагностика и вибромониторинг общих дефектов машинного оборудования	48
3. Оптические методы, визуальный и измерительный контроль	53
3.1. Классификация оптических методов контроля	53
3.2. Особенности визуального контроля	54
3.3. Визуально-оптический и измерительный контроль	58
4. Капиллярный контроль	66
4.1. Физическая сущность капиллярного контроля	66
4.2. Классификация и особенности капиллярных методов	70
4.3. Технология капиллярного контроля	72
4.4. Проверка чувствительности капиллярного контроля	73
5. Течеискание	75
5.1. Термины и определения течеискания, количественная оценка течей	75
5.2. Способы контроля и средства течеискания	77
5.3. Масс-спектрометрический метод	80
5.4. Галогенный и катарометрический методы	83
5.5. Жидкостные методы течеискания	85
5.6. Акустический метод	86
6. Радиационный контроль	88
6.1. Источники ионизирующего излучения	88
6.2. Контроль прошедшим излучением	92
6.3. Радиографический контроль сварных соединений	94
7. Магнитный неразрушающий контроль	98
7.1. Область применения и классификация	98
7.2. Магнитные характеристики ферромагнетиков.	99

7.3. Магнитные преобразователи	103
7.4. Магнитная дефектоскопия, магнитопорошковый метод	107
7.5. Дефектоскопия стальных канатов	113
7.6. Метод магнитной памяти	116
7.7. Магнитная структуроскопия	120
8. Вихретоковый, электрический и тепловой виды контроля	129
8.1. Вихретоковый вид контроля	129
8.2. Электрический вид контроля	132
8.3. Тепловой вид контроля	135
9. Ультразвуковой неразрушающий контроль	139
9.1. Акустические колебания и волны	139
9.2. Затухание ультразвука	142
9.3. Трансформация ультразвуковых волн	145
9.4. Способы получения и ввода ультразвуковых колебаний. Конструкция пьезопреобразователей	147
9.5. Аппаратура, методы и технология ультразвукового контроля	151
10. Акустико-эмиссионный метод	159
10.1. Источники акустической эмиссии	159
10.2. Виды сигналов АЭ	160
10.3. Оценка результатов АЭ контроля	163
10.4. Аппаратура АЭ контроля	166
10.5. Порядок проведения и область применения АЭ контроля	173
11. Дegrаdационные процессы оборудования и материалов	178
11.1. Дegrаdационные процессы, виды предельных состояний	178
11.2. Характеристика дegrаdационных процессов	179
11.3. Виды охрупчивания сталей и их причины	185
11.4. Контроль состава и структуры конструкционных материалов	188
11.5. Оценка механических свойств материалов	193
11.6. Способы отбора проб металла и получения информации о его свойствах	199
12. Оценка остаточного ресурса оборудования	203
12.1. Методология оценки остаточного ресурса	203
12.2. Оценка ресурса при поверхностном разрушении	206
12.3. Прогнозирование ресурса при язвенной коррозии	208
12.4. Прогнозирование ресурса по трещиностойкости и критерию «течь перед разрушением»	211
12.5. Оценка ресурса по коэрцитивной силе	216
12.6. Оценка ресурса по состоянию изоляции	220
13. Особенности диагностирования типового технологического оборудования	223
13.1. Диагностирование буровых установок	223
13.2. Диагностирование линейной части стальных газонефтепроводов и арматуры	233
13.3. Диагностирование сосудов и аппаратов, работающих под давлением	251
13.4. Диагностирование установок для ремонта скважин	257
13.5. Диагностирование вертикальных цилиндрических резервуаров для нефтепродуктов	261
13.6. Диагностирование насосно-компрессорного оборудования	271
Список литературы	277

Учебное издание

Богданов Евгений Александрович

**ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Редактор *О.А. Кузнецова*

Внешнее оформление *А.Ю. Войткевич*

Технический редактор *М.М. Яровицкая*

Компьютерная верстка *Ю.А. Кунашова*

Корректоры *Т.А. Вавилова, Г.Н. Петрова*

Лицензия ИД № 06236 от 09.11.01.

Изд. № РЕНТ-324. Подп. в печать 24.04.06.

Формат 60×88¹/₁₆. Бум. офсетная. Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная.
Объем 17,15 усл. печ. л. 17,65 усл. кр.-отт. Тираж 2000 экз. Зак. № 6245.

ФГУП «Издательство «Высшая школа»,
127994, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Тел.: (495) 200-04-56

<http://www.vshkola.ru>. E-mail: info_vshkola@mail.ru

Отдел реализации: (495) 200-07-69, 200-31-47, факс: (495) 200-34-86.
E-mail: sales-vshkola@mail.ru

Отпечатано в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В.И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, пр-т им. Ю. Гагарина, 2.