

РД 03-421-01 Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов

РД 03-421-01

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

УТВЕРЖДЕНЫ постановлением Госгортехнадзора России от 06.09.01 N 39

В настоящих Методических указаниях изложены технические требования и рекомендации по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов, эксплуатируемых в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности.

При разработке настоящих Методических указаний учтены опыт и практические результаты диагностирования технического состояния сосудов и аппаратов, использована современная методология оценки и прогнозирования технического состояния, изложен порядок проведения и оформления результатов диагностирования технического состояния сосудов и аппаратов.

В развитие основных требований настоящих Методических указаний могут выпускаться нормативные технические документы с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации оборудования.

В разработке Методических указаний приняли участие представители Госгортехнадзора России и специализированных организаций: А.А.Шаталов, В.А.Баранов, Г.М.Селезнев, Н.А.Хапонен, С.А.Жулина, Н.М.Самсонов, В.В.Раков, В.И.Рачков, П.А.Харин, С.М.Кутепов, В.С.Шубин, В.И.Муштаев, А.М.Кузнецов, В.И.Лившиц, В.Г.Татаринов, А.П.Корчагин, С.П.Быков, В.И.Олеринский, А.В.Шишкин, И.В.Петрушин, Е.Н.Гальперин, Р.Г.Маннапов, В.М.Горицкий.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие Методические указания распространяются на отечественные и зарубежные стальные сосуды и аппараты химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности. Методические указания могут быть распространены на сосуды других отраслей при условии, что на них распространяются требования [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#), [Правил проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных \(ПБ 03-384-00\)](#)*, ОСТ 24.201.03-90 "Сосуды и аппараты стальные высокого давления. Общие технические требования".

* До введения [ПБ 03-384-00](#) действует [ОСТ 26-291-94 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия"](#).

Настоящие Методические указания содержат основные требования и рекомендации к проведению диагностирования технического состояния* и определению остаточного ресурса эксплуатации сосудов.

* Далее - техническое диагностирование.

Термины и их определения, примененные в настоящих Методических указаниях, приведены в приложении А.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Техническое диагностирование сосудов и аппаратов в целях определения возможности их дальнейшей эксплуатации и остаточного ресурса проводится в следующих случаях:

после аварий;

после ремонтно-восстановительных работ с применением сварки;

при выявлении случаев нарушения установленного регламента эксплуатации (повышения рабочего давления, расширения диапазона рабочих температур, увеличения цикличности нагружения и др.);

по истечении установленного в паспорте сосуда срока эксплуатации (исчерпанию установленного ресурса);

при отсутствии в паспорте сосуда расчетного срока службы после эксплуатации в течении 20 лет, если нет других решений о расчетном сроке службы, согласованных с Госгортехнадзором России;

при отсутствии в паспорте сосуда, работающего при переменном режиме нагружения,

допускаемого числа циклов нагружения;

при утрате паспорта сосуда;

наступления сроков, установленных по результатам предыдущих технических диагностирований.

1.2. Работы по техническому диагностированию сосудов носят комплексный характер и в общем случае включают:

а) анализ технической документации;

б) наружный и внутренний осмотр, визуально-измерительный контроль сосуда;

в) контроль соответствия системы автоматизации требованиям [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#);

г) неразрушающий контроль качества сварных соединений, толщинометрию;

д) определение химического состава, металлографические исследования, оценку механических свойств основного металла и сварных соединений;

е) проведение коррозионных исследований;

ж) анализ результатов технического диагностирования и проведение расчетов на прочность;

з) анализ повреждений и параметров технического состояния сосуда и установление критериев предельного состояния;

и) проведение уточненных расчетов на прочность;

к) определение остаточного ресурса сосуда;

л) гидравлические (пневматические) испытания.

Работы по подп. "а", "б", "в", "г", "ж", "к", "л" носят обязательный характер.

Работы по подп. "д", "е", "з", "и" могут проводиться дополнительно к основным работам при технической необходимости.

1.3. Объем работ по техническому диагностированию сосуда определяется по каждому конкретному объекту с учетом особенностей конструкции, сроков и условий эксплуатации.

1.4. Работы по техническому диагностированию сосуда должны выполняться по программе, разрабатываемой в соответствии с требованиями настоящих Методических указаний.

1.5. При оценке ресурса группы сосудов, однотипных по конструктивному и материальному исполнению и работающих в одинаковых условиях, производится полный комплекс работ по настоящим Методическим указаниям для отдельных представителей группы сосудов и в зависимости от полученных результатов может быть снижен объем контрольных работ на других сосудах данной группы.

1.6. Техническое диагностирование сосудов выполняется специализированной организацией силами специалистов, аттестованных в установленном порядке.

1.7. На основании результатов технического диагностирования специализированная организация выдает Заключение о возможности и условиях дальнейшей безопасной эксплуатации сосуда (далее - Заключение), оформленное в установленном порядке.

1.8. В случае если в Заключении возможность дальнейшей эксплуатации сосуда допускается только при условии его ремонта, все ремонтные работы, включая разработку технологии ремонта, должны проводиться согласно требованиям [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#) [1], и [Положения о порядке безопасного проведения ремонтных работ на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих опасных производственных объектах \(РД 09-250-98\)](#) [62].

1.9. К выполнению сварочных работ на сосудах должны допускаться специалисты, аттестованные в установленном порядке.

1.10. Все участки основного металла или сварных соединений, подвергавшиеся ремонту с применением сварки, следует проконтролировать двумя или более неразрушающими методами, один из которых предназначен для обнаружения поверхностных дефектов, а второй - для выявления внутренних дефектов; в необходимых случаях следует провести толщинометрию с оформлением соответствующих заключений о результатах контроля (приложение Б).

2. ПОДГОТОВКА СОСУДОВ И АППАРАТОВ К ТЕХНИЧЕСКОМУ ДИАГНОСТИРОВАНИЮ

2.1. Перед диагностированием сосудов и аппаратов следует прекратить их эксплуатацию, освободить внутреннее пространство от заполняющей среды, отключить заглушками от всех трубопроводов, соединяющих диагностируемые сосуды с источниками давления и другими сосудами и оборудованием.

Применяемые для отключения сосудов заглушки, устанавливаемые между фланцами, должны быть соответствующей прочности и иметь выступающую часть (хвостовик), по которой определяется наличие поставленной заглушки. Устанавливаемые между фланцами прокладки должны быть без хвостовиков.

2.2. При необходимости, если внутреннее пространство сосуда было загрязнено какими-либо вредными веществами, оно должно быть очищено и нейтрализовано в соответствии с инструкцией по безопасному ведению работ на предприятии - владельце сосуда.

2.3. Внутренняя и наружная поверхности сосуда очищаются от продуктов коррозии и оставшейся грязи с использованием металлической щетки и ветоши, смоченной растворителем, а контролируемые сварные соединения с внутренней или наружной стороны зачищаются до металлического блеска механическим методом (шлифмашинкой, абразивом и т.п.) до Rz40-Rz20 на ширину 50-100 мм (в зависимости от толщины стенки сосуда) по обе стороны от оси шва. При зачистке ось вращения инструмента должна быть параллельна оси контролируемых сварных швов.

2.4. Футеровка, изоляция и другие виды покрытий должны быть частично или полностью удалены, если имеются признаки, указывающие на возможность возникновения дефектов материала силовых элементов конструкции сосуда (неплотность футеровки, отдулины, следы промокания изоляции и т.п.).

2.5. Подготовленные к техническому диагностированию поверхности необходимо высушить сжатым воздухом.

2.6. Необходимо оснастить сосуд достаточным освещением от источника тока напряжением не более 12 В, а для сосудов, работающих со взрывоопасными средами и (или) во взрывоопасных зонах, - освещением светильниками во взрывозащищенном исполнении с соответствующей степенью или уровнем защиты.

2.7. Должны быть оборудованы безопасные подходы к сосуду и в случае необходимости установлены леса, лестницы, переходные мостики и ограждения для осмотра верхней части сосуда и проведения технического диагностирования.

2.8. Работы по подготовке сосуда к техническому диагностированию выполняются организацией - владельцем сосуда.

2.9. Работы по подготовке сосуда завершаются оформлением акта о готовности сосуда и передачей акта специализированной организации, выполняющей техническое диагностирование.

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.1. Анализ технической документации

3.1.1. Анализ технической документации на сосуд проводится в целях:

проверки наличия паспорта сосуда и правильности его заполнения;

установления фактических условий эксплуатации сосуда и соответствия их паспортным данным;

анализа результатов предшествовавших диагностированию технических освидетельствований, ранее проведенных диагностирований и ремонтно-восстановительных работ;

уточнения фактической наработки сосуда в часах или циклах нагружения (для сосудов периодического действия).

3.1.2. Анализ в общем случае подвергается следующая техническая документация:

паспорт сосуда, работающего под давлением;

сборочный чертеж;

ремонтная документация;

эксплуатационные документы;

предписания территориального органа Госгортехнадзора России;

заключения по результатам предыдущих технических освидетельствований и технических диагностирований.

При анализе технической документации проверяются:

наличие в паспорте сосуда записи о его регистрации;

соответствие заводской маркировки сосуда на корпусе и на фирменной табличке паспортным данным;

использование сосуда по прямому назначению.

По результатам анализа технической документации уточняется программа технического диагностирования.

3.1.3. Особое внимание уделяется анализу сведений о повреждениях и неисправностях в работе сосуда и о причинах, приведших к ним.

3.2. Оперативная (функциональная) диагностика

3.2.1. Рабочая (проектная) документация на систему автоматизации сосудов должна соответствовать требованиям разд.5 [Правил устройства и безопасной эксплуатации](#)

[сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#).

3.2.2. Контрольно-измерительные приборы (КИП), установленные на щитах системы автоматизации (СА) и по месту, должны соответствовать рабочей (проектной) документации на СА сосуда.

3.2.3. КИП должны быть метрологически поверены и иметь соответствующие клейма и отметки.

3.2.4. Блокировки безопасности, выполненные на сосудах и в СА, должны соответствовать рабочей (проектной) документации.

3.2.5. Если выявлено несоответствие КИП измеряемым параметрам, а блокировок безопасности - требованиям [ПБ 10-115-96](#) или рабочей (проектной) документации, то решение о дальнейшей эксплуатации сосуда принимается организацией - разработчиком документации или специализированной организацией, проводящей техническое диагностирование сосуда.

Специализированная организация, выполняющая техническое диагностирование, выдает заключение о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации сосуда после устранения выявленного несоответствия.

3.2.7. Результаты контроля соответствия СА сосуда требованиям [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#), оформляются в виде раздела к отчету или акта проверки, являющегося приложением к основному Заключению.

3.3. Разработка программы технического диагностирования

3.3.1. Работы по техническому диагностированию сосудов и аппаратов должны выполняться по программе, разрабатываемой на сосуд или группу сосудов на основании настоящих Методических указаний и с учетом требований норм и правил, предъявляемых к сосудам при их изготовлении.

3.3.2. Программа технического диагностирования должна составляться с учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации сосуда и предусматривать перечень и объем работ, соответствующих требованиям настоящих Методических указаний.

3.3.3. Программа должна разрабатываться специализированной организацией, выполняющей работы по техническому диагностированию, и подлежит согласованию в установленном порядке.

3.4. Проведение наружного и внутреннего осмотра

3.4.1. Наружный и внутренний осмотр сосуда проводится в целях выявления дефектов, которые могли возникнуть как в процессе его эксплуатации, так и при его изготовлении, транспортировке и монтаже.

3.4.2. При осмотре защитные покрытия и изоляция подлежат удалению на участках поверхности сосуда, где имеются явные признаки нарушения их целостности.

Необходимость удаления защитного покрытия и изоляции на других участках поверхности сосуда определяется специалистами организации, проводящей техническое диагностирование.

3.4.3. Осмотру подлежат все доступные сварные соединения сосуда и его элементы в целях выявления в них следующих дефектов:

трещин;

свищей и пористости швов;

подрезов, наплывов, прожогов, незаплавленных кратеров;

смещений и уводов кромок стыкуемых элементов свыше норм, предусмотренных [Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#), [Правилами проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных \(ПБ 03-384-00\)](#) и ОСТ 24.201.03-90 "Сосуды и аппараты стальные высокого давления. Общие технические требования";

несоответствий форм и размеров швов требованиям технической документации;

деформаций поверхности сосуда (в виде вмятин, отдулин и т.п.).

3.4.4. Особое внимание следует обратить на состояние сварных соединений в зонах концентрации напряжений (местах приварки горловины люка и штуцеров к обечайке и днищам, особенно в зонах входных и выходных штуцеров, на участках пересечения швов, в зонах сопряжения обечайки с днищами, местах приварки опорных узлов и др.), а также в местах возможного скопления конденсата и зонах проведенного ранее ремонта.

3.4.5. Для сосудов из аустенитных сталей особое внимание при осмотре следует уделять местам возможного попадания на поверхность сосуда воды, паров и влажных газов ввиду возможного образования в этих местах коррозионных трещин.

3.4.6. При проведении осмотра в случае возникающих сомнений по классификации и размерам выявленных дефектов следует применять лупу 4-20-кратного увеличения, а также по усмотрению специалиста, выполняющего осмотр, любой из неразрушающих методов, указанных в пп.3.6.1-3.6.3, 3.6.5-3.6.7 настоящих Методических указаний.

3.4.7. Оценка выявленных при осмотре деформированных участков поверхности сосуда производится путем замера максимального прогиба и площади деформированного участка. Замер производится мерительным инструментом, обеспечивающим погрешность $\pm 1,0$ мм.

3.4.8. Нормы допустимых дефектов, выявленных при наружном и внутреннем осмотре, должны соответствовать требованиям [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#), [Правил проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных \(ПБ 03-384-00\)](#) и ОСТ 24.201.03-90 "Сосуды и аппараты стальные высокого давления. Общие технические требования".

3.4.9. Результаты осмотра оформляются в виде заключения (протокола), подписываемого специалистами организации, проводящей техническое диагностирование.

3.5. Исследование коррозионного состояния сосудов

3.5.1. При исследовании коррозионного состояния сосудов устанавливают:

степень коррозионно-эрозионного поражения внешней и внутренней поверхности сосудов в результате эксплуатации;

наличие (отсутствие) механических повреждений, дефектов, допущенных ранее при изготовлении сосуда, которые могут повлиять на дальнейшую безопасную эксплуатацию сосуда.

3.5.2. Инструменты для проведения исследований:

лупы, в том числе измерительные от 1,5 до 7-кратного увеличения по [ГОСТ 25706-83](#) [44];

иглы измерительные - для определения глубины пор, язв, подрезов и т.п.;

щупы N 2-4;

нутромеры микрометрические по [ГОСТ 10-88](#) [5] и индикаторные по [ГОСТ 868-82](#) [6];

шаблоны (типа УШС по ТУ 1021.338-83 [7]) радиусные и др.;

линейки измерительные металлические по [ГОСТ 427-75](#) [8];

магниты металлические.

3.5.3. При внешнем осмотре определяют:

наличие (отсутствие) коррозионно-эрозионных поражений, особенно в местах подачи рабочей среды, где могли быть проливы, в местах ремонта;

видимые поверхностные дефекты, появившиеся и развившиеся в процессе эксплуатации, например вмятины, выпучины, изменения геометрической формы (коробление, провисание и другие отклонения от первоначального расположения);

отмечают места ремонтов и устанавливают наличие документации на ремонт.

Необходимость и объем демонтажа теплоизоляции определяется специалистами, проводящими обследование, с учетом требований настоящих Методических указаний.

Осмотру подлежат внешние опоры аппаратов, при этом необходимо проверять сварные швы приварки опор к корпусу аппарата.

На теплообменном и другом оборудовании, где часто производится открывание и закрывание крышек, люков-лазов и т.п., необходимо осматривать крепеж на соответствие требованиям ОСТ 26-2043-91 [9].

3.5.4. При внутреннем осмотре определяют наличие (отсутствие) коррозионных трещин, язв, питтингов, сплошной коррозии на основном металле, сварных швах и околошовной зоне, в местах ремонта, застойных зонах, под осадком, в зоне скопления конденсата, где возможно возникновение щелевой коррозии.

3.5.5. Оценка коррозионных и механических дефектов.

Коррозионные и механические дефекты оцениваются по глубине, площади и количеству на 1 дм² (или 1 м²). Глубина проникновения коррозии определяется после удаления продуктов коррозии.

Скорость сплошной коррозии оценивается в соответствии с [ГОСТ 9.908-85](#) [10].

При обнаружении трещин коррозионного или механического характера эксплуатация сосуда должна быть прекращена. По результатам коррозионного обследования составляется акт, в котором указываются дата, место обследования, регистрационный и заводской номера сосуда, обнаруженные дефекты, состояние поверхности, скорость коррозии конструкционных материалов.

3.5.6. Особенности обследования оборудования из коррозионностойких сталей и сплавов.

3.5.6.1. Коррозионностойкие (нержавеющие) стали при высокой стойкости против сплошной, язвенной, щелевой и точечной (питтинговой) коррозии могут быть подвержены межкристаллитной коррозии (МКК).

МКК характеризуется избирательным разрушением границ зерен металла и приводит к резкому снижению его прочности и пластичности.

МКК проявляется в зоне термического влияния сварных швов.

3.5.6.2. В некоторых средах (азотная кислота, нитраты и т.п.) возможно проявление ножевой коррозии по линии сплавления сварного шва, которая является разновидностью МКК.

3.5.6.3. В растворах хлоридов, щелочах, ряде кислот при повышенных температурах (обычно выше 40-50 °С) нержавеющие стали подвержены коррозионному растрескиванию (КР). Наибольшая вероятность КР возникает в местах наибольших остаточных напряжений после сварки, штамповки, гибов и т.п.

3.5.6.4. Для выявления склонности к МКК и КР сварных соединений из нержавеющих аустенитных сталей следует применять метод травления по [ГОСТ 6032-89](#) [46] и (или) токовихревой метод, капиллярную дефектоскопию, магнитопорошковый контроль и другие методы неразрушающего контроля.

3.6. Проведение неразрушающего контроля

Контролю неразрушающими методами следует подвергать сварные соединения и основной металл сосуда.

Контроль выполняет специализированная организация, имеющая опыт работ, обладающая методической документацией на контроль, аттестованными специалистами, технической базой.

Контроль сварных соединений предусматривает применение не менее двух неразрушающих методов, один из которых предназначен для обнаружения поверхностных дефектов, а другой - для выявления внутренних дефектов в сварных соединениях. Применяемые методы выбираются по усмотрению специалистов, проводящих техническое диагностирование.

Для выявления дефектов в сварных соединениях могут использоваться следующие неразрушающие методы контроля:

визуально-измерительный;

ультразвуковая дефектоскопия;

радиографический контроль;

капиллярная дефектоскопия или магнитопорошковый контроль;

акустико-эмиссионный контроль;

токовихревой метод контроля и другие, обеспечивающие требуемый объем контроля и точность выявления дефектов.

3.6.1. Контроль сварных соединений ультразвуковым или радиографическим методом

3.6.1.1. Неразрушающий контроль сварных соединений следует проводить ультразвуковым (УЗК) или радиографическим (РК) методом в соответствии с действующими на данный момент нормативно-техническими документами на данные методы для выявления внутренних дефектов сварных соединений в виде трещин, непроваров, пор и неметаллических включений.

3.6.1.2. Для проведения контроля методом УЗК или РК применяется аппаратура, предназначенная для этих целей и обладающая необходимой чувствительностью.

3.6.1.3. При разработке индивидуальных программ технического диагностирования в них следует указывать зоны и объем контроля сварных соединений сосудов.

3.6.1.4. Контроль сварных соединений и основного металла сосудов и устранение выявленных недопустимых дефектов рекомендуется проводить в следующем порядке:

анализ технической документации по изготовлению, эксплуатации, ремонтам и контролю, ранее проведенным на сосуде;

визуальный контроль;

выдача задания на подготовку сварных соединений для дефектоскопии;

магнитопорошковый или капиллярный контроль;

ультразвуковой или радиационный контроль;

устранение выявленных недопустимых дефектов;

дефектоскопия ремонтируемых участков.

3.6.1.5. Объем дефектоскопического контроля сварных соединений сосудов зависит от группы сосуда [табл.6 [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#)], от объема контроля, выполненного в процессе изготовления сосуда и в процессе его эксплуатации, и определяется в каждом конкретном случае специалистами, проводящими диагностирование. Необходимо, чтобы объем полученной информации позволял достоверно судить о техническом состоянии всех несущих элементов сосуда. Объем контроля сварных соединений определяется в процентах от общей длины сварных швов.

3.6.1.6. В случае обнаружения при осмотре сосуда локально-деформированных участков (например вмятин, выпучин, гофров и т.п.) деформированную зону и прилегающую к ней зону недеформированного металла шириной 100-150 мм по периметру следует подвергнуть контролю на отсутствие трещин с помощью дефектоскопии.

3.6.1.7. Дефектоскопии следует подвергать элементы оборудования или сварные соединения, качество металла которых вызывает сомнение.

3.6.1.8. При назначении выборочного (неполного) контроля сварных соединений следует учитывать, что участки пересечения продольных и кольцевых сварных швов обязательно должны быть включены в зоны контроля.

3.6.1.9. При технической невозможности осмотра внутренней или наружной поверхности сосуда объем контроля сварных соединений независимо от группы сосуда должен составлять 100%.

3.6.1.10. При обнаружении недопустимых дефектов в процессе неполного контроля сварных соединений объем контроля должен быть увеличен не менее чем вдвое. В первую очередь следует расширить зоны контроля сварных швов в местах обнаружения дефектов.

3.6.1.11. После проведения ультразвукового контроля в необходимых случаях дополнительно для уточнения характера дефектов и глубины их расположения может быть применен радиографический метод, метод послойного вскрытия сварного соединения или металлографический метод.

3.6.1.12. Шероховатость поверхности сварных соединений, подлежащих УЗК, должна соответствовать нормативным требованиям. Для зачистки поверхности сварных соединений рекомендуется применять щетки, шлифмашинки, пескоструйную, химическую и другую обработку.

3.6.1.13. Качество сварных соединений сосуда признается неудовлетворительным, если при любом виде контроля будут выявлены наружные или внутренние дефекты, выходящие за пределы допусковых величин, установленных нормативными документами.

3.6.1.14. Результаты контроля оформляются в виде заключения или протокола. Расположение участков контроля с привязкой к основным размерам элементов сосуда следует условно изображать на прилагаемой к заключению или протоколу схеме.

Рекомендуемая форма заключения по УЗК качества сварных соединений приведена в приложении Б.

3.6.2. Контроль методами цветной и магнитопорошковой дефектоскопии

3.6.2.1. Контроль внутренней и (или) наружной поверхностей элементов сосудов методами цветной (ЦД) и магнитопорошковой (МПД) дефектоскопии следует проводить в соответствии с действующими на данный момент нормативно-техническими документами на данные методы для выявления и определения размеров и ориентации поверхностных и подповерхностных трещин, расслоений и других трещиноподобных дефектов.

3.6.2.2. Контроль методами ЦД и МПД проводят на контрольных участках поверхности элементов, указанных в программах диагностирования, и, кроме того, на участках поверхности, где по результатам визуального контроля или анализа эксплуатационно-

технической документации предполагается наличие трещин, а также в местах выборок трещин, коррозионных язв и других дефектов и (или) в местах ремонтных заварок.

3.6.2.3. Результаты контроля поверхности элементов сосуда методом ЦД или МПД рекомендуется оформлять в виде заключений (протоколов), в которых следует приводить описание размеров, формы и месторасположения выявленных дефектов. Расположение участков контроля и выявленных дефектов следует условно изображать на прилагаемой к заключению (протоколу) схеме.

Рекомендуемая форма заключения по контролю поверхности элементов сосудов методами ЦД и МПД приведена в приложении Б.

3.6.3. Метод акустико-эмиссионного контроля

3.6.3.1. Метод акустико-эмиссионного контроля (АЭК) должен применяться в соответствии с требованиями [Правил организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов \(РД 03-131-97\)](#) [11].

3.6.3.2. Метод АЭК обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов. Поэтому он позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности.

3.6.3.3. Метод АЭК обеспечивает контроль всего сосуда с использованием одного или нескольких преобразователей акустической эмиссии (АЭ), неподвижно установленных на поверхности сосуда.

3.6.3.4. Положение и ориентация дефекта не влияют на его выявляемость.

3.6.3.5. Особенностью метода АЭК является сложность выделения полезного сигнала из помех в том случае, когда дефект мал, и вероятность выявления такого источника АЭ высока только при резком развитии дефекта и при приближении его размеров к критическому значению.

Поэтому метод АЭК рекомендуется применять в сочетании с другими методами НК в зависимости от характера дефектов.

3.6.3.6. При диагностировании сосудов, находящихся в эксплуатации, в целях сокращения объема работ по подготовке сосуда и контролю традиционными методами желательно первоначально провести АЭК объекта. В случае выявления источников АЭ в месте их расположения провести контроль одним из традиционных методов неразрушающего контроля (УЗК, РК, МПД или ЦД).

Возможна схема, при которой в случае обнаружения дефектов традиционными методами, опасность того или иного дефекта выявляется в результате контроля сосуда методом АЭК.

Кроме того, в отдельных случаях, при возникновении сомнения в достоверности результатов применяемых методов контроля также может быть использован метод АЭК.

В этих случаях решение о допуске сосуда в эксплуатацию или о его ремонте принимается по результатам проведенного АЭК.

3.6.3.7. В случае наличия в сосуде дефекта, выявленного одним из методов НК, метод АЭК может быть использован для слежения за развитием этого дефекта.

3.6.3.8. Метод АЭК в соответствии с [Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#), должен применяться при пневмоиспытаниях сосудов в качестве сопровождающего метода, повышающего безопасность проведения испытаний. В этом случае целью применения АЭК является обеспечение предупреждения возможности разрушения сосуда.

Рекомендуется использовать метод АЭК и при гидравлических испытаниях сосудов.

3.6.3.9. АЭК сосудов проводится специализированными организациями и аттестованными специалистами не ниже уровня квалификации, установленного действующими нормативно-техническими документами.

Рекомендуемые формы протокола и заключения по результатам контроля методом АЭК приведены в [Правилах организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов \(РД 03-131-97\)](#).

3.6.4. Ультразвуковая толщинометрия

3.6.4.1. Ультразвуковая толщинометрия (УЗТ) применяется в целях определения количественных характеристик утонения стенок элементов сосуда в процессе его эксплуатации. По результатам УЗТ определяют скорость коррозионного или коррозионно-эрозионного изнашивания стенок и устанавливают расчетом на прочность допустимый срок эксплуатации изношенных элементов, уровень снижения рабочих параметров или сроки проведения восстановительного ремонта.

3.6.4.2. Для измерений толщины металла могут быть использованы ультразвуковые толщинометры, соответствующие требованиям действующей нормативно-технической документации и обеспечивающие погрешность измерения не более $\pm 0,1$ мм.

3.6.4.3. Контроль толщины стенки проводят в местах элементов сосуда, указанных в специальных инструкциях, в типовых или индивидуальных программах диагностирования, а также в зонах интенсивного коррозионно-эрозионного износа металла, в местах выборок дефектов и на поверхности вмятин или выпучин.

3.6.4.4. Толщинометрия может проводиться как по наружной, так и по внутренней поверхностям сосуда. Измерения осуществляются по четырем образующим обечайки и четырем радиусам днищ через 90° по окружности элемента. На каждой царге обечайки сосуда проводится не менее трех измерений по каждой образующей (в середине и по краям).

На днищах проводится не менее пяти измерений: на каждом из четырех радиусов и в центре. При обнаружении зон с расслоением металла число точек измерения в этом месте должно быть увеличено до количества, достаточного для установления границ (контура) зоны расслоения металла.

3.6.4.5. Измерения толщины стенки вварных патрубков диаметром (- диаметр отверстия, не требующий укрепления) и более согласно [ГОСТ 24755-88](#) [63] следует проводить в одном сечении в четырех точках, расположенных равномерно по окружности элемента.

3.6.4.6. В случае невозможности выполнения УЗТ сосуда по полной программе число точек замера толщины стенок должно быть таким, чтобы обеспечить максимально надежное представление о состоянии сосуда и проведение прочностных расчетов. Для повышения достоверности результатов замеров толщины стенок рекомендуется использовать статистический подход, изложенный в п.4.2.

3.6.4.7. В местах измерения толщины поверхность должна быть защищена до металлического блеска. Толщина металла определяется как среднее значение из результатов трех измерений.

3.6.4.8. Результаты УЗТ элементов сосуда рекомендуется оформлять в виде заключений (протоколов), в которых следует приводить схему расположения мест замера толщины и таблицу значений измеренной толщины.

Рекомендуемая форма заключения по УЗТ элементов сосуда приведена в Приложении Б.

3.6.5. Вихретоковая дефектоскопия

Вихретоковый неразрушающий контроль - это контроль, основанный на взаимодействии внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этим полем в объекте контроля.

Этот метод эффективен для выявления поверхностных и подповерхностных трещин в ферромагнитных материалах. Достоинством вихретокового контроля является сравнительная простота, высокая производительность и чувствительность. Метод может быть использован для контроля металла в околошовных зонах сварных швов, особенно в местах концентрации напряжений (местах приварки патрубков, люков, горловин, фланцев и др.). Метод эффективен для выявления трещин коррозионного растрескивания, а также межкристаллитной коррозии, но он не может быть рекомендован для контроля сварных швов в целях выявления внутренних дефектов. Поэтому при диагностировании сосудов и аппаратов наиболее целесообразно применять вихретоковый метод в сочетании с ультразвуковым, радиографическим или акустико-эмиссионным методами.

3.6.6. Замеры твердости

3.6.6.1. Замеры твердости основного металла и сварных соединений сосудов рекомендуется производить в следующих случаях:

если показатель твердости является одной из определяющих характеристик свойств основного металла и сварных соединений по паспорту и в результате условий эксплуатации сосуда (температура, давление, среда) или в результате аварийной ситуации могли произойти необратимые изменения этого показателя;

для оценки механических свойств по показателю твердости в случае необратимых изменений этих свойств в результате условий эксплуатации сосуда или в результате аварийной ситуации;

для оценки механических свойств в случае необходимости идентификации основных и сварочных материалов при отсутствии сведений о них (например, при утрате и связанной с этим необходимостью восстановления паспорта сосуда), а также в случае необходимости идентификации импортных сталей.

Вероятность необратимых изменений и соответственно необходимость замера твердости в этом случае определяет специализированная организация, выполняющая техническое диагностирование сосудов.

3.6.6.2. Для измерения твердости ударным методом деталей с толщиной менее 10 мм рекомендуется пользоваться только приборами с малой энергией удара типа "Эквотип" с индентором-датчиком "С", либо приборами типа УЗИТ-2М или ХПО-10.

В каждой точке (шов, зона термического влияния, основной металл) производится не менее трех замеров; в протокол заносятся минимальные, максимальные и средние значения твердости.

В случае получения результатов измерения твердости, не соответствующих требованиям стандартов, производится не менее двух дополнительных замеров на расстоянии 20-50 мм от точек, показавших неудовлетворительный результат.

При подтверждении полученного значения твердости производится выявление размеров участка или длины шва с отклонениями по твердости. Количество дополнительных замеров твердости и их частоту определяют специалисты, проводящие диагностирование.

3.6.6.3. Зачистку площадок для измерения твердости рекомендуется производить шлифовальными машинами. Размер площадок определяется исходя из конструкции инденторов твердомера. Оптимальный размер 50x50 мм. Глубина вышлифовки при первой серии замеров твердости должна быть в пределах 0,5 мм, при второй серии замеров - 1,5-2,5 мм. Чистота поверхности должна быть не ниже Rz20.

3.6.6.4. Оценку механических свойств по показателям твердости производят аналоговым путем или по формулам, полученным расчетно-экспериментальным методом.

Временное сопротивление и предел текучести могут быть определены с помощью переносных твердомеров по [ГОСТ 22761-77](#) [12] и [ГОСТ 22762-79](#) [13].

3.6.6.5. Результаты замера твердости и перевода показателей твердости в показатели механических свойств оформляются в виде заключения, подписываемого специалистами организации, проводящей диагностирование сосудов.

3.6.7. Металлографический анализ

3.6.7.1. Металлографический анализ следует производить в следующих случаях:

для подтверждения изменений характеристик твердости и механических свойств, определяемых в случаях, оговоренных подп.3.6.6.1 настоящих Методических указаний;

при необходимости уточнения характера дефектов, выявленных при контроле неразрушающими методами.

3.6.7.2. Металлографический анализ выполняется путем приготовления микрошлифа непосредственно на сосуде, травления, снятия с него полистирольной реплики и последующего осмотра и фотографирования структуры со снятой реплики на оптическом микроскопе с разрешающей способностью до $\times 400$.

3.6.7.3. При технической возможности вырезки образцов из сосуда металлографический анализ производится на микрошлифах, изготовленных из этих образцов.

3.6.7.4. Результаты металлографического анализа оформляются в виде заключения, подписываемого специалистами организации, проводящей диагностирование сосудов.

3.7. Лабораторные исследования металлов

3.7.1. Лабораторные исследования основного металла и сварных соединений следует выполнять в случаях, оговоренных в пп.3.6.6, 3.6.7, на образцах основного металла и сварных соединений при условии технической возможности вырезки указанных образцов из сосудов.

3.7.2. При лабораторных исследованиях определяются механические свойства, проводится металлографический анализ и определяется химический состав основного металла и сварных соединений, при этом химический состав определяется только в случае необходимости идентификации основных и сварочных материалов.

3.7.3. Химический анализ основного металла и сварных соединений допускается производить химическим методом на стружке, снятой непосредственно с конструктивных элементов сосуда, и спектральным методом переносным спектрометром на сосуде.

3.7.4. Перечень и объем лабораторных исследований определяются специализированной организацией, проводящей техническое диагностирование.

3.7.5. Изготовление и испытание образцов для определения механических свойств, металлографические исследования и определение химического состава следует производить в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

3.7.6. Результаты лабораторных исследований оформляются в виде заключения, подписываемого специалистами организации, проводящей диагностирование сосудов.

3.8. Фрактографический анализ

3.8.1. Фрактографический анализ проводится при аварийном разрушении сосуда для выявления механизмов повреждения, а также в случае обнаружения при осмотре сосуда дефектов в виде трещин неизвестного происхождения. Фрактографические исследования могут применяться при проведении работ в соответствии с подразд.3.7 для получения дополнительных данных о свойствах металла.

3.8.2. Фрактографический анализ предусматривает получение качественной и количественной информации о строении изломов с помощью визуального их рассмотрения, а также с использованием оптических и электронных микроскопов и других приборов (электронно-фрактологический анализ).

3.8.3. При анализе причин трещинообразования или разрушения фрактографический анализ проводится на макро- и (или) микроуровне. В первом случае при визуальном рассмотрении или при небольших (до 50 крат) увеличениях для получения интегральной картины процесса разрушения (с выделением по виду излома характерных зон, указывающих на характер силового воздействия, ориентацию и макрогеометрию излома, степень пластической деформации, микромеханизм разрушения и цвет излома), во втором случае - с привлечением широкого диапазона увеличений (100-50000 крат) в целях получения подробностей рельефа излома в пределах отдельных зерен и субзерен.

3.8.4. Классификацию видов изломов по всей площади поверхности разрушения следует проводить в соответствии с рекомендациями [41].

3.8.5. В целях более достоверного определения причины трещинообразования или разрушения сосуда следует установить очаг зарождения трещины и его связь с природой (причиной) образовавшихся дефектов металла, в том числе со шлаковинами, неметаллическими включениями, непроварами, несплавлениями, коррозионными язвами и механическими повреждениями (вмятины, задиры и т.д.).

3.8.6. При кристаллическом характере поверхности разрушения элемента сосуда очаг зарождения трещины определяется по "шевронному" рисунку (рельефу), а именно - по направлению сходимости лучей (ступенек) рельефа, указывающего на направление к очагу

зарождения трещины.

3.8.7. Для усталостного излома свойственна относительно плоская, без развитого рельефа поверхность разрушения, не обнаруживающая признаков пластической деформации, а при условии отсутствия смыкания берегов трещины - наличие на поверхности разрушения усталостных бороздок (следов периодической остановки трещины).

3.8.8. В ряде случаев очаг зарождения усталостной трещины выявляется по изменению цвета излома и наличию на поверхности разрушения концентрических (относительно очага зарождения трещины) линий (бороздок), появление которых связано с изменением режима нагружения и состава коррозионной среды.

3.8.9. Электронно-фрактологический анализ изломов, возникших при эксплуатации сосудов, проводится после очистки поверхности разрушения от грязи и продуктов с помощью органических растворителей (ацетон, керосин, толуол, бензин, гексан, гептан и т.п.) и последующей осушки излома с целью удаления влаги.

3.8.10. Выбор оборудования для проведения электронно-фрактографического анализа изломов осуществляют в соответствии с МР 5-81 [42].

3.8.11. При определении технического состояния сосудов, выполненных из материалов, у которых под действием эксплуатационных факторов может происходить изменение исходных свойств, приводящее к их охрупчиванию, проводится оценка вида и величины (степени) охрупчивания материала под воздействием технологических и эксплуатационных факторов.

3.8.12. К технологическим факторам охрупчивания относятся все виды воздействий на стадиях изготовления (вальцовка, подгиб кромок, сварка, термообработка и т.д.), транспортировки и монтажа сосуда.

3.8.13. К эксплуатационным факторам охрупчивания относятся все виды тепловых, механических, коррозионно-механических и коррозионных воздействий в период эксплуатации сосуда, включая технологические и внеплановые остановы.

3.8.14. К числу основных видов охрупчивания, возникающих при эксплуатации конструкций, относятся:

а) тепловая хрупкость, обусловленная сегрегацией вредных примесей типа фосфора и его химических аналогов и выделением карбидов по границам зерен при длительном воздействии повышенных температур (150-500 °С);

б) водородная хрупкость, вызванная воздействием водорода и водородосодержащих газовых и жидкостных сред;

в) деформационное старение в зонах конструкции, испытывающих малоцикловую усталость и статическую или циклическую перегрузку в результате накопления при пластической

деформации дефектов кристаллической решетки типа дислокации и последующего закрепления их атомами внедрения типа углерода и азота;

г) сульфидное растрескивание, обусловленное влиянием сульфидсодержащих составляющих в жидкой и газовой средах;

д) коррозионное растрескивание под напряжением, вызванное одновременным воздействием механических нагрузок и электрохимических процессов коррозии;

е) хлоридное растрескивание, связанное с присутствием в жидкой фазе ионов хлора.

3.8.15. В зависимости от конструктивных особенностей сосуда, наличия зон с различными условиями эксплуатации (температура, давление, среда и т.д.), режимов сварки и материального исполнения элементов конструкции степень охрупчивания металла может существенно различаться, что следует учитывать при выборе места отбора проб.

3.8.16. В зависимости от потенциальной опасности, возникающей при разрушении конструкции, возможных механизмов повреждаемости металла, сроков ее эксплуатации и иных важных обстоятельств организация, проводящая диагностирование, совместно с владельцем сосуда согласовывает методику отбора проб металла, предусматривающую вырезку заготовок (макропроб) или спил, срез, сруб малых проб (микропроб), не нарушающих целостность конструкции.

3.8.17. Места вырезки заготовки для изготовления стандартных образцов, ориентация оси концентраторов (надрезов) в этих образцах определяются в зависимости от конструктивных особенностей сосуда, ожидаемых мест максимальной повреждаемости материала и условий возможного ремонта конструкции.

3.8.18. Технология вырезки заготовки для изготовления стандартных образцов определяется по [ГОСТ 7268-82](#) [43] с учетом конструктивных особенностей сосуда и условий максимального облегчения последующих ремонтных работ по восстановлению работоспособности конструкции.

3.8.19. Каждая заготовка должна иметь маркировку с указанием мест отбора проб и направления ориентировки характерного элемента заготовки по отношению к элементу конструкции.

3.8.20. При использовании методики малых проб с толщиной микропроб, не превышающих глубину коррозионных язв, питтинга или толщиной 2,5-5% от толщины стенки сосуда, отбор проб проводят механическим (спил, срез, сруб) или физическим (электроискровым и т.д.) способами без применения огневого воздействия на металл. Технология проведения работ должна обеспечить минимальную деформацию металла при отборе проб.

3.8.21. Рекомендуемый размер микропроб от элементов сосуда должен быть не менее 1,2x1,5x15 мм, а минимальная площадь сечения в ее срединной части - не менее 3 мм².

3.8.22. Каждая микропроба должна иметь сопровождающую записку, указывающую место ее отбора и направление ориентировки длинной стороны микропробы относительно элемента конструкции.

3.8.23. После проведения отбора микропроб металла места отбора подвергаются механической зачистке (с помощью шлиф-машинки или другими способами) для устранения концентраторов напряжений.

3.8.24. На каждую конструкцию составляется карта отбора микропроб с указанием места отбора по отношению к сварному соединению: основной металл, металл сварного шва и околошовной зоны и зон сосуда; при этом для двухфазной среды выделяются зоны с исключительно газовой и жидкостной средой и зоной переменного смачивания.

3.8.25. Подготовка проб к исследованию.

3.8.25.1. В целях выявления межзеренной хрупкости, которая свойственна видам хрупкости, указанным в п.3.8.14 "а", "б", "г", "д", "е" и др., электронно-фрактографический анализ проводится на хрупких кристаллических зонах изломов стандартных образцов ([ГОСТ 9454-88](#)[24]) или микропроб, а также на элементах конструкции в случае их разрушения.

3.8.25.2. При фрактографическом анализе излома стандартных образцов исследованию подлежит поверхность разрушения в пределах "хрупкого квадрата" (кристаллического строения поверхности разрушения центральной части образца).

3.8.25.3. При определении доли межкристаллитного разрушения на микропробах форма их и размеры произвольны в той степени, чтобы хрупкий излом надежно характеризовал состояние материала в исследуемых зонах (элементах) конструкции.

3.8.25.4. В целях ограничения влияния предварительной пластической деформации, возникающей при разрушении, на строение изломов рекомендуется использовать образцы и микропробы с острым V-образным надрезом ([ГОСТ 9454-88](#)).

3.8.25.5. Температура испытания стандартных образцов, предназначенных для электронно-фрактографического анализа, устанавливается по положению кривой температурной зависимости ударной вязкости $KCV = f(T_{исп})$ и доли волокна в изломе $B = f(T_{исп})$ для исследуемого материала так, что должна быть ниже и (KCV=20 Дж/см²) на 70 °С и 20 °С соответственно, где - критическая температура, устанавливаемая по наличию в изломе 50%-ной волокнистой составляющей, $T_{к(KCV=20 \text{ Дж/см}^2)}$ - критическая температура определяемая по величине ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом, равной 20 Дж/см².

3.8.25.6. Температура испытания микропроб от сосудов, которые изготовлены из известных сталей, определяется аналогичным образом. Для случаев, когда сериальные кривые KCV=

$f(T_{\text{исп}})$ и $B = f(T_{\text{исп}})$ для обследуемой конструкции неизвестны, то температуру первого испытания целесообразно выбрать в диапазоне температур от -60 до -120 °С. По результатам первого испытания микропробы следует произвести коррекцию температуры последующих испытаний.

3.8.25.7. При наличии информации о хрупком разрушении конструкции из углеродистых и низколегированных сталей при комнатной и более высоких температурах в целях удобства и экономии хладагента первые испытания ударных образцов и микропроб рекомендуется проводить при комнатной температуре.

3.8.25.8. В целях предотвращения коррозионных повреждений поверхности разрушения отогрев изломов следует производить в ванне с предохраняющей от коррозии жидкостью (ацетоном, толуолом, гексаном и т.п.), а сушку - с помощью фена или вакуумирования.

3.8.25.9. При измерении доли структурных составляющих хрупкого излома просматривают не менее 50-100 полей зрения при 1000-3000-кратном увеличении в растровом электронном микроскопе и 500-600 полей зрения с 3-5 реплик (с числом полей зрения в каждой реплике не менее 70) при 4000-6000-кратном увеличении в просвечивающем электронном микроскопе.

3.8.25.10. Рабочее увеличение, используемое при электронно-фрактографическом анализе, определяется из условия, чтобы размер поля (кадра) не превышал или был равен наиболее вероятному размеру наименьшего структурного элемента, например, фасетки транскристаллитного скола.

3.8.25.11. В каждом из полей зрения (кадра) отмечают преобладающий ($\pm 85\%$) характер разрушения: хрупкий транскристаллитный скол (Х), ямочный (Я), межкристаллитный (М) и смешанные: (М+Я), (М+Х), (Х+Я). Доля межкристаллитной составляющей определяется по формуле

$$f_M = \frac{\sum M + \sum (M + X) / 2 + \sum (M + Я) / 2}{N} 100\%$$

где N - общее число полей зрения;

$\sum M$ - суммарное число полей, занятых данным видом структурной составляющей излома.

Аналогичным образом устанавливается доля полей $\sum (M + X) / 2$, занятая фасетками хрупкого транскристаллитного скола.

3.8.25.12. Приведенная доля межкристаллитной составляющей, отражающая увеличение длины свободного пробега элементарной хрупкой микротрещины за счет ослабленных границ зерен, определяется по отношению величины $\sum (M + X) / 2$ к площади хрупкой зоны излома, занятой фасетками транскристаллитного скола и фасетками межкристаллитного разрушения:

$$F_M = \frac{f_M}{f_M + f_X} 100\%$$

3.8.25.13. Смещение критической температуры, связанной с величиной межкристаллитного охрупчивания стали, устанавливается по соотношению

$$\Delta T_K = T_K^3 - T_K^И = T_K^0 + K(F_M^3 - F_M^И),$$

где T_K^3 и $T_K^И$ - критические температуры хрупкости металла после эксплуатации и в исходном состоянии (до эксплуатации) соответственно;

K - постоянная материала, зависящая от типа структуры: $K = 10$ °С для стали со структурой феррита и феррит+перлит, $K = 20$ °С для стали со структурой мартенсита и бейнита, в том числе мартенсита и бейнита отпуска, и смешанной структурой, в которой присутствуют продукты сдвигового (бездиффузионного) превращения;

K - коэффициент пропорциональности, зависящий от вида межкристаллитного разрушения: $K = 3,0$ °С/% для межзеренного разрушения по границам бывших зерен аустенита в сталях, структура которых образовалась по сдвиговому механизму превращения и $K = 1,04$ °С/% для межсубзеренного разрушения в сталях, структура которых образовалась по сдвиговому механизму превращения, и межзеренного разрушения в сталях, испытывавших диффузионное превращение;

F_M^3 и $F_M^И$ - приведенные доли межкристаллитного разрушения в металле после эксплуатации и в исходном состоянии соответственно.

3.8.25.14. Установление вида межкристаллитного разрушения в сталях, показывающих в структуре продукты сдвигового превращения, проводят по характеристикам структуры хрупкого излома путем измерения фасеток хрупкого межкристаллитного и транскристаллитного сколом разрушения: если средний размер фасетки межкристаллитного разрушения меньше среднего размера фасетки транскристаллитного скола, то имеет место межсубзеренное разрушение, а в иных случаях - межзеренное.

3.8.25.15. Для сосуда, выполненного из разнородных материалов, степень межзеренного охрупчивания определяется для каждой стали.

3.8.25.16. Для сварных конструкций рекомендуется оценку степени охрупчивания стали производить для основного металла, металла сварного шва, для околошовной зоны.

3.8.25.17. Для сосудов с антикоррозионным защитным покрытием, эксплуатируемых при повышенных (выше 150 °С) температурах допускается проводить отбор проб металла с наружной стороны конструкции. Степень охрупчивания металла со стороны защитного покрытия рассчитывается специализированной организацией с учетом перепада температур

по толщине стенки.

3.8.25.18. При прогнозировании характеристик трещиностойкости и остаточного ресурса сосуда, выполненного из материалов, склонных к хрупкому разрушению, и эксплуатируемого в диапазоне температур вязкохрупкого перехода, скорость охрупчивания стали определяется как $V_{\text{охр}} = \Delta T_{\text{к}} / \tau$, где τ - продолжительность эксплуатации сосуда.

3.9. Анализ результатов технического диагностирования и проведение расчетов на прочность

3.9.1. Анализ прочности является одним из наиболее ответственных этапов диагностирования, в результате которого определяются фактические запасы прочности сосуда по его состоянию на момент диагностирования, устанавливается соответствие сосуда требованиям действующих норм прочности и определяются условия и ресурс дальнейшей безопасной эксплуатации.

3.9.2. Расчет на прочность выполняется с учетом результатов технического диагностирования в соответствии с подразд.3.1-3.8 настоящих Методических указаний. В расчетах учитываются фактические значения толщин стенок элементов сосудов, размеры и расположение выявленных дефектов, результаты исследований свойств металла. Расчеты на прочность выполняются на основании требований действующих нормативных документов (приложение В).

Расчетам на прочность подвергаются все основные конструктивные элементы сосуда: цилиндрические, конические или сферические корпуса, выпуклые и плоские днища и крышки, укрепление отверстий, фланцы и т.д. Расчеты на прочность проводятся с учетом всех видов нагрузок, действующих на сосуд: внутреннего, внешнего давления, при необходимости - ветровых и сейсмических воздействий, веса аппарата и примыкающих к нему элементов.

Расчеты на статическую прочность проводятся в обязательном порядке. Расчет на циклическую прочность проводится, когда количество циклов нагружения сосуда превышает 1000. Когда в процессе эксплуатации возможен переход материала сосуда в хрупкое состояние, то необходимо оценивать прочность и остаточный ресурс сосуда с учетом хрупкого разрушения.

Различные особые случаи определения остаточного ресурса сосудов приведены в разд.6 и 7 настоящих Методических указаний.

3.9.3. В тех случаях, когда расчетов на прочность по действующим нормативным документам недостаточно, то проводятся уточненные расчеты в соответствии с рекомендациями разд.5 настоящих Методических указаний.

3.9.4. В случае обнаружения недопустимых дефектов типа вмятин, выпучин, смещения кромок стыкуемых элементов, овальности, а также внутренних дефектов в сварных швах

допускается определять их влияние на прочность сосуда расчетом по РД 26-6-87 [14], ПНАЭ Г-7-002-86 [15] или с помощью специальных методов расчетов, согласованных с Госгортехнадзором России, или экспериментально.

3.9.5. При невозможности расчетной или экспериментальной оценки влияния дефекта или при неудовлетворительных результатах, полученных в соответствии с п.3.9.4 или разд.5, дефектное место подлежит ремонту (в случае его ремонтпригодности) с обязательным последующим обследованием места ремонта и проведением расчета на прочность.

3.10. Гидравлические (пневматические) испытания сосуда

3.10.1. Гидравлические испытания, являющиеся завершающим этапом работ по диагностированию, проводятся в целях проверки прочности и плотности элементов сосуда. Гидравлическое испытание проводится при положительных результатах диагностирования или после устранения выявленных дефектов в соответствии с требованиями [Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#).

3.10.2. Значение пробного давления определяется по рабочим параметрам сосуда (давлению и температуре), которые устанавливаются по результатам диагностирования.

3.10.3. Гидравлическое испытание может быть заменено пневматическим при условии контроля процесса нагружения методом АЭК; контроль осуществляется в соответствии с требованиями [Правил организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов \(РД 03-131-97\)](#).

3.10.4. В том случае, когда при проведении гидравлических испытаний используется метод АЭК, величина давления в соответствии с [Правилами организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов \(РД 03-131-97\)](#) может быть принята равной 1,05 рабочего давления.

3.10.5. В том случае, когда при диагностировании в качестве неразрушающего метода контроля использован метод АЭК в соответствии с п.3.6.3, гидравлическое (пневматическое) испытание в соответствии с п.3.10.1 допускается не проводить, если в сосуде не были выявлены дефекты, требующие ремонта.

3.10.6. Сосуд считается выдержавшим гидравлические 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 АЭК).

4. АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

4.1.1. Дефекты и повреждения сосудов и аппаратов.

Повреждения сосудов и аппаратов возникают вследствие воздействия различных эксплуатационных факторов. Наиболее распространенные виды повреждений обусловлены следующими воздействиями: коррозией металла (сплошной или общей, пятнами, межкристаллитной, язвенной, питтинговой, щелевой, контактной, структурно-избирательной, атмосферной, коррозионным растрескиванием и др.), эрозионным истиранием стенок рабочей среды, усталостью, ползучестью, изменением физико-химических свойств металла и другими причинами.

В сосудах, работающих в водородосодержащих средах, под воздействием водорода, при повышенных температуре и давлении, могут возникнуть водородная коррозия, охрупчивание (снижение трещиностойкости) и снижение пластичности металла.

Наиболее часто встречаемыми повреждениями поверхностей нагрева являются свищи, отдулины, трещины и разрывы в местах сварки штуцеров, которые могут быть вызваны различными причинами.

При эксплуатации и ремонте сосудов возможно механическое повреждение поверхностей в виде вмятин или царапин, а также при нарушении технологии ремонта возможны дефекты сварных швов и изменение свойств основного металла.

Воздействие вышеуказанных факторов при эксплуатации вызывает изменение технического состояния сосудов, проявляющееся в уменьшении толщины стенок, изменении геометрических размеров сосудов, механических свойств и структуры металла, возникновении локальных повреждений в виде трещин, каверн, язв, появлении участков пластической деформации или изменении других параметров технического состояния (ПТС) сосудов.

Предельно допустимые значения ПТС, установленные в нормативно-технической документации, называют критериями предельного состояния (КПС), которые являются критериями для оценки технического состояния сосудов при диагностировании и определении их остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Дефекты и повреждения, которые в момент контроля не являются критическими, но могут за период планируемой эксплуатации достичь значений КПС, при проведении диагностирования должны быть выявлены и устранены. Для выявления таких дефектов применяют критерии отбраковки (КО) элементов сосудов, изложенные в п.4.1.3.

4.1.2. Нормы оценки технического состояния сосудов.

Нормы оценки технического состояния сосудов (аппаратов), при которых допускается их дальнейшая эксплуатация без проведения специальных расчетов, определяются нормативной технической документацией на сосуды, устанавливающей допуски на отклонение геометрических размеров сосудов, механических свойств и структуры металла, размеры дефектов, в частности:

размеры основных элементов сосуда должны соответствовать проектным, указанным в паспорте и заводских чертежах, с учетом допусков на размеры полуфабрикатов и их изменение при технологических операциях на заводе-изготовителе;

механические свойства металла основных элементов сосуда, указанные в сертификатных данных, должны удовлетворять требованиям соответствующих нормативных документов;

отклонения формы, увод (угловатость) кромок в сварных швах, смещение кромок стыкуемых листов должны соответствовать допускам, установленным [Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением \(ПБ 10-115-96\)](#), и (или) требованиями [Правил проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных \(ПБ 03-384-00\)](#), ОСТ 24.201.03-90 "Сосуды и аппараты стальные высокого давления. Общие технические требования" и другими нормативными документами.

При выявлении в ходе диагностирования сосудов отклонений каких-либо параметров от норм, установленных на сосуды, необходимо производить оценку технического состояния сосудов по критериям отбраковки, приведенным в п.4.1.3, и проводить анализ их влияния на безопасность эксплуатации сосуда.

4.1.3. Критерии отбраковки при диагностировании сосудов.

Эксплуатационные нормы допускаемых размеров повреждений могут превышать технологические допуски на изготавливаемые сосуды. Основные критерии отбраковки элементов сосудов при их диагностировании приведены ниже.

4.1.3.1. Допускаемые отклонения геометрических размеров и формы сосудов - отклонение от прямолинейности образующей цилиндрического корпуса сосуда, отклонение диаметра сосуда, овальность, допускаемые размеры отдельных выпуклостей (выпучин) и вогнутостей (вмятин), смещение кромок сварных швов указаны в нормативной документации на сосуды (отраслевые стандарты, технические условия на изделия). Если измеренные отклонения геометрических размеров сосудов не превышают допусков, то сосуды могут быть допущены к дальнейшей эксплуатации без исправления. Если размеры отклонений больше допускаемых, то вопрос о возможности дальнейшей эксплуатации сосуда без исправления решается на основе расчета на прочность специализированной организацией.

4.1.3.2. Допускаемые толщины стенок сосудов и размеров коррозионных повреждений.

При равномерной коррозии минимальная толщина стенок элементов корпуса сосуда должна

быть не менее расчетной с учетом эксплуатационной прибавки на коррозию. В качестве расчетной (отбраковочной) величины различных конструктивных элементов сосудов принимается наибольшая толщина, полученная из расчетов на прочность и устойчивость при различных режимах эксплуатации и испытания. Если минимальная толщина стенки равна расчетной без эксплуатационной прибавки, то возможность дальнейшей эксплуатации сосуда и остаточный срок его службы устанавливаются при условии изменения рабочих параметров эксплуатации.

Для сосудов из пластичных материалов в условиях эксплуатации участки с локальными коррозионными повреждениями, расположенные на расстоянии не менее $\sqrt{D(S-C)}$ от штуцеров или других элементов, вызывающих краевой эффект, могут быть допущены к эксплуатации без ремонта, если одиночные коррозионные язвы, эрозионные повреждения (нетрещиноподобного вида) имеют глубину не более 80% от минимальной толщины стенки элемента, определенной при толщинометрии, и имеют длину не более величины, вычисленной по формуле

$$L \leq 1,2B\sqrt{D(S-C)}, \text{ где } B = (1 - C_1/S) / \sqrt{C_1/S},$$

где D - внутренний диаметр сосуда,

C - расчетная прибавка на равномерную коррозию.

Одиночными считаются дефекты, расстояние между ближайшими кромками которых составляет не менее длины меньшего дефекта. Если это расстояние меньше, то дефекты считаются взаимодействующими. В этом случае два дефекта (или несколько) могут рассматриваться как один, длина которого принимается равной расстоянию между наиболее удаленными кромками этих дефектов, а глубина принимается равной наибольшей глубине дефектов.

Если размеры дефектов превышают L , то вопрос о возможности ремонта или допуска к дальнейшей эксплуатации сосуда без ремонта решается на основе расчета на прочность специализированной организацией.

4.1.3.3. Сосуды с трещинами любых видов, трещиноподобными дефектами и дефектами, размеры которых превышают допускаемые, к эксплуатации не допускаются. Вопрос о возможности допуска к эксплуатации сосуда с указанными дефектами решается специализированной организацией с учетом рекомендаций подразд.6.5 настоящих Методических указаний.

4.1.3.4. Для конкретных типов аппаратов (реакторов, автоклавов, теплообменников и др.) критерии отбраковки могут регламентироваться в технической документации с учетом характера нагрузки на элементы оборудования и свойств применяемых материалов.

4.1.4. Контроль исправленных дефектов.

Исправленные дефекты после выборки (зашлифовки) абразивным инструментом (с плавным округлением краев выборок) должны быть проконтролированы методом ЦД или МПД по всей поверхности выборок.

Заваренные после выборки дефекты должны быть проконтролированы неразрушающими методами контроля. Выборки дефектов могут быть допущены к эксплуатации без заварки, если их глубина и длина не превышает значений, указанных в подп.4.1.3.2. Вопрос о возможности эксплуатации сосуда без заварки выборок, превышающих указанные размеры, решается специализированной организацией на основе расчета на прочность.

Отбракованные элементы после их ремонта должны быть проконтролированы в соответствии с подразд.3.6; при невозможности (нецелесообразности) ремонта они могут быть подвергнуты более детальному исследованию (расчетному или экспериментальному) в целях определения возможности и условий их дальнейшей безопасной эксплуатации.

4.2. Анализ погрешности контроля размеров повреждений и параметров технического состояния

4.2.1. Источники погрешностей и достоверность контроля.

Источники погрешностей при контроле подразделяются на объективные и субъективные. Субъективными являются погрешности, обусловленные действиями конкретного оператора, зависящими от его квалификации, физико-психических данных, состояния здоровья в момент контроля и др., и особенностями условий проведения контроля.

Объективными являются погрешности метода и средств измерений, а также статистические отклонения, обусловленные выборочным контролем показателей, имеющих естественный разброс (рассеяние).

При контроле дефектов и повреждений на сосудах, измерении параметров их технического состояния необходимо знать возможную величину погрешности контроля, которая определяет степень его достоверности и влияет на величину допускаемого ресурса дальнейшей безопасной эксплуатации сосудов.

Достоверность контроля характеризует степень соответствия его результатов фактическому техническому состоянию объекта и определяется двумя показателями: точностью и доверительной вероятностью. Точность контроля (размеров обнаруженных дефектов, геометрических размеров элементов сосудов и других параметров технического состояния сосудов) указывают в виде доверительного интервала (например, для измеренной толщины стенки: 19 ± 1 мм) или односторонней доверительной границы (например, толщина стенки не менее 18 мм). Доверительную вероятность, то есть вероятность нахождения фактического размера внутри доверительного интервала стандарты по измерениям

рекомендуют указывать в зависимости от ответственности контроля (как правило, $\alpha = 0,95$).

4.2.2. Факторы, влияющие на достоверность контроля.

К основным факторам, влияющим на достоверность контроля при диагностировании сосудов, относятся следующие: методические погрешности, метрологические погрешности, особенности условий проведения контроля, психофизические факторы, статистические отклонения.

Методические погрешности обусловлены несовершенством методик контроля, основанных на определении контролируемого параметра через косвенные параметры. Например, при измерении толщины стенки сосуда методом УЗК прибор определяет время прохождения отраженных ультразвуковых волн от противоположной стороны стенки листа металла. Если на стенке имеются отложения или ее поверхность повреждена коррозией, то время прохождения ультразвуковой волны через стенку сосуда будет несколько отличаться от времени, измеренного на образцах. Величина этого отличия и составляет методическую погрешность.

Метрологические погрешности обусловлены наличием для любого прибора или мерительного инструмента устойчивой вероятности отклонения измеренного значения параметра от фактического значения контролируемого параметра, при этом величина отклонения зависит от класса точности прибора (инструмента). Величина метрологической погрешности при диагностировании сосудов при правильном выборе класса точности приборов и инструментов, как правило, не оказывает существенного влияния на достоверность контроля, так как бывает значительно ниже методической погрешности.

Особенности условий проведения контроля определяются возможностями доступа к объекту контроля, возможностями создания для операторов-дефектоскопистов оптимальных эргономических условий. Наличие помех (ограниченного доступа, затрудненных условий работы операторов) может вызывать дополнительные погрешности при контроле. Особые неудобства испытывают операторы при работе внутри сосудов из-за трудностей создания в них оптимальных рабочих условий (температуры, влажности, чистого воздуха в рабочей зоне, освещенности, удобства расположения тела и др.). При отсутствии оптимальных условий для работы операторов чаще возможны ошибки в их работе, увеличиваются погрешности измерений.

Психофизические факторы (иногда применяют выражение "человеческий фактор") определяют точность действий конкретного оператора в момент проведения контроля. Состояние каждого человека не бывает совершенно одинаковым в разные дни и часы работы. Возможны ухудшения здоровья, нарушение внимания и правильности действий в течение рабочего дня. При этом оператором могут быть допущены погрешности в правильности настройки прибора, установки датчика по отношению к объекту контроля, погрешности в прочтении показаний прибора, ошибки в записи показаний и т.п. Во многом стабильность контроля при возникновении для оператора неблагоприятных психофизических факторов зависит от его квалификации, профессионального и жизненного опыта, дисциплинированности.

Важной мерой предупреждения ошибок контроля, обусловленных психофизическими факторами, является контроль операторов со стороны руководителей и обеспечение ими необходимых мер для нормальной работы (обучение и проведение экзаменов по специальности и технике безопасности, прохождение медицинского контроля, создание оптимальных условий работы).

Статистические отклонения имеют место в случаях проведения выборочного контроля.

Сплошной контроль элементов сосудов всеми методами выполнить не всегда возможно (из-за недоступности некоторых участков), а в ряде случаев в этом нет необходимости, поэтому применяют выборочный контроль и оценку поврежденности по наибольшим размерам выявленных дефектов; оценку возможной при этом погрешности осуществляют с помощью статистических методов.

Например, при измерении толщины стенок портативными ультразвуковыми толщиномерами типов "Кварц-15", УТ-93П суммарная методическая и метрологическая погрешность измерений составляет до 0,1-0,2 мм. Более высокую погрешность контроля обуславливают статистические отклонения толщины стенок, присущие листовому прокату, из которого изготавливают аппараты. Допуск на отклонения толщины листов проката достигает 5% номинального размера и при толщинах более 20 мм отклонения могут достигать 1 мм.

Значительный разброс результатов измерений толщины стенок может наблюдаться из-за неравномерности их коррозии, вызванной различием условий нагружения различных участков поверхностей (различием концентраций агрессивных компонентов, температур, скоростей потоков, механических напряжений и др.), а также стохастическими свойствами процесса коррозии.

Участки, подвергающиеся повышенным нагрузкам и коррозии, обычно известны, определяются по конструктивным признакам и по результатам внутреннего осмотра аппаратов (см. подразд.3.4 настоящих Методических указаний). Именно такие участки и подвергают более тщательному контролю. Однако и в пределах одного участка возможно существенное различие толщины стенок. Поэтому минимальная измеренная толщина может оказаться выше фактической минимальной на данном участке, поскольку точки измерения располагают на поверхности в некоторой последовательности, случайной по отношению к вероятностному распределению толщин. Достоверность контроля при этом может быть определена по статистическим закономерностям распределения толщин стенок сосудов с учетом вида и интенсивности коррозии стенок.

4.2.3. Количественная оценка достоверности контроля.

Количественная оценка достоверности контроля осуществляется путем определения доверительного интервала или односторонней доверительной границы контролируемого параметра с заданной доверительной вероятностью.

Известно, что размеры листов проката металла, прочностные характеристики металла

(временное сопротивление, предел текучести) распределены по нормальному закону. Параметрами нормального распределения являются математическое ожидание (среднее значение показателя) и среднее квадратическое отклонение.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) контролируемого параметра может быть определено по экспериментальным данным (результатам контроля) или априорно путем суммирования дисперсий от независимых составляющих погрешностей.

Например, СКО результатов контроля толщины стенок сосуда может быть определено по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}, \quad (4.1)$$

где σ - СКО, обусловленное методической и метрологической погрешностью контроля; при контроле методом УЗТ при отсутствии расслоений металла σ может составлять величины порядка 0,1-0,2 мм.

σ_1 - СКО от влияния условий проведения контроля; может составлять величины от 0 (при толщинометрии, проводимой в помещении с наружной поверхности сосуда) до 0,2 мм (при контроле внутри сосуда).

σ_2 - СКО статистической погрешности контроля, вызванной отклонением толщин проката металла и неравномерностью коррозии; может составлять от 0,2 мм при равномерной коррозии до 0,5 мм и выше при неравномерной коррозии.

Таким образом, величина СКО, определенная по формуле (4.1), составляет 0,22-0,6 мм.

4.2.4. Планирование необходимого объема контроля и определение минимальной толщины стенок сосудов с учетом статистических отклонений толщины проката металла и неравномерности коррозии.

При планировании контроля возникает вопрос о необходимом и достаточном числе участков (точек на поверхности аппарата) n , выбираемых для измерений. Чем больше n , тем выше достоверность контроля, но тем выше и его трудоемкость. Ниже рассмотрены возможные варианты контроля.

Сплошной контроль. В машиностроении термин "сплошной контроль" означает контроль каждой единицы из партии изделий. Применительно к контролю толщины стенок сосуда термин "сплошной контроль" означает контроль каждого участка поверхности S , глубина коррозии (и толщина стенки) на котором может отличаться от соседних участков. При сплошном контроле отсутствует статистическая погрешность; погрешность контроля определяется технической погрешностью приборов и условиями контроля.

В случаях необходимости контроля толщины при неравномерной коррозии стенок (- порядка 0,01 м) и поверхности аппарата, составляющей несколько квадратных метров, сплошной контроль может потребовать нескольких сотен измерений ($N = F / F_0$).

В случаях равномерной коррозии (0,2-1) м (отклонения толщины, измеренной в разных точках поверхности аппарата, будут соответствовать отклонениям толщины листов проката металла). Соответственно необходимое число точек для контроля толщины будет составлять от одной до пяти на 1 м .

Выборочный контроль. Выборочным называется контроль, при котором назначаемое число точек контроля меньше, чем при сплошном контроле, то есть $N < F / F_0$, где - площадь контролируемой поверхности. Достоверность контроля при выборочном контроле зависит от отношения $N / (F / F_0)$, в частности, от степени неравномерности коррозии, характеризующейся величиной . При выборочном контроле достоверность контроля может быть достаточно высокой, если определено СКО измеряемой толщины.

СКО может быть определено по данным измерений по формулам (4.2) и (4.3) или априорно, в частности, по табл.4.2.

Для определения СКО по формулам (4.2) и (4.3) измерения толщины должны быть произведены на нескольких участках поверхности (не менее десяти), находящихся в одинаковых условиях эксплуатации и расположенных друг от друга на расстоянии не менее 0,5 м при равномерной коррозии и не менее двукратного среднего размера очагов (пятен) коррозии при неравномерной коррозии. Оценка среднего значения СКО вычисляется по формуле (4.2), и затем по формуле (4.3) - верхняя доверительная граница СКО, используемая для расчетов:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - S)^2}}{N-1}, \quad (4.2)$$

где - результаты измерений толщины на -х участках поверхности;

- средняя измеренная толщина;

- число участков замера (величина должна быть не менее 10, так как при меньшем значении точность оценки неудовлетворительна).

Верхнюю доверительную границу СКО определяют по формуле

$$\sigma_B = K\sigma, \quad (4.3)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ - определяется по табл.4.1 в зависимости от S .

Таблица 4.1

	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
	1,65	1,59	1,55	1,52	1,49	1,46	1,44	1,42	1,40	1,37
	22	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	1,35	1,32	1,28	1,23	1,20	1,18	1,16	1,15	1,14	1,13

Если рассчитанная $\sigma_{\text{в}}$ окажется меньше $\sigma_{\text{п}}$ (см. табл.4.2), характеризующей отклонение толщины листов проката металла, то неравномерность коррозии незначительна, и в расчетах следует принимать $\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{п}}$ из табл.4.2.

Таблица 4.2

S , мм	До 4	6	8	10	16	20	24	30	40 и более
$\sigma_{\text{п}}$, мм	0,12	0,15	0,18	0,2	0,27	0,3	0,32	0,36	0,4

Минимальную возможную толщину стенки аппарата с учетом неконтролируемых участков поверхности определяют по формуле

$$S_{\text{min}} = S - K_1 \sigma_{\text{в}}, \quad (4.4)$$

где K_1 - определяется по табл.4.3 в зависимости от доверительной вероятности P .

Таблица 4.3

P , %	95	98	99	99,9
K_1	1,64	2,05	2,33	3,1

При необходимости более точной оценки остаточной толщины стенки на каком-либо участке поверхности аппарата число измерений увеличивают, имея в виду, что уменьшение ошибки контроля пропорционально $\frac{1}{\sqrt{n}}$.

4.2.5. Планирование минимально необходимого объема контроля размеров локальных повреждений.

При наличии на поверхности сосуда большого числа рассредоточенных локальных

коррозионных повреждений (язв, питтингов) и невозможности измерения глубины каждого повреждения для объективной оценки средней и максимальной глубины повреждений на поверхности сосуда необходимо планировать число измерений.

Минимальное необходимое число точек на поверхности для измерений следует выбирать в зависимости от степени неравномерности коррозии, характеризующейся коэффициентом вариации глубин повреждений (по табл.4.4).

Таблица 4.4 *

* Содержание таблицы соответствует оригиналу.
Примечание "КОДЕКС".

Минимальное число точек для измерений

		при						
0,05	0,8	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
	0,9	4	13	25	50	100	200	315
	0,95	8	25	65	100	250	500	650
	0,99	13	40	100	1500	400	650	1000
0,1	0,8	25	100					