

УДК 658.58:621.791(679.14)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И БЕЗАВАРИЙНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*д-р техн. наук Л.С. ДЕНИСОВ, И.А. ТАРАНЕНКО, А.П. ГОЛДАР
(Информационно-технический центр по сварке и диагностике, Минск)*

Рассмотрены состояние и процедуры технической диагностики потенциально опасного емкостного оборудования. Рекомендованы объемы работ и эффективные способы неразрушающего контроля, показана необходимость прочностных расчетов и ресурса оборудования.

Краткое введение в техническую диагностику. Современное развитое общество характеризуется огромным, постоянно возрастающим во времени, потреблением энергии. Это предопределяет необходимость ее накопления и запаса для выполнения различных функций деятельности человека, в том числе в быту, на предприятиях, транспорте, энергетике, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и пр.

В этой связи особенно актуальна проблема безопасного хранения энергетических запасов в виде нефти, газа и других производных легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности Республики Беларусь, осуществляемая широко разветвленной сетью стационарных резервуарных парков сосудов и емкостей различной вместимости, а также транспортных цистерн (емкостного оборудования).

Анализ технического состояния резервуаров, цистерн и емкостей показывает, что при эксплуатации в течение 10-20 лет они подвержены коррозионным поражениям, деформациям конструкции, неравномерным осадкам оснований, разрушению трубной обвязки и вспомогательного оборудования, росту дефектов и образованию опасных трещин в местах напряжений, хлопнунов, отпотин, структурно-механической деградации металла и других эксплуатационных дефектов.

Уже сегодня большая часть (80...90 %) технологического оборудования нефтегазохимических производств отработало свой нормативный ресурс, а основные фонды предприятий практически не обновляются [1].

Особенно важно своевременно и достоверно осуществлять контроль за состоянием основного металла и металла сварных соединений (швов). Как показывает отечественный и зарубежный опыт, своевременный контроль основного металла и сварных соединений резервуаров и прочих емкостей, находящихся в длительной (более 10 лет) эксплуатации, предотвращает хрупкое разрушение металла, появление течей, потерю устойчивости и катастрофические последствия [2].

Поэтому в условиях длительной эксплуатации емкостного оборудования необходимо проведение своевременной, полной и качественной технической диагностики с определением работоспособности, остаточного ресурса и сроков дальнейшего использования емкостного оборудования, что позволит обеспечить снижение техногенных аварий и катастроф.

В практике технической диагностики принят подход, основанный на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию». Оценка технического состояния рассматриваемого сооружения осуществляется по параметрам технического состояния (ПТС), которые обеспечивают надежную эксплуатацию емкостного оборудования. Остаточный ресурс устанавливается по определяющим параметрам технического состояния. Определяющими (доминирующими) параметрами технического состояния, являются такие параметры, изменения которых в отдельности или совокупности могут привести к отказу в работе оборудования, разрушению или потере своего функционального назначения.

Для емкостного оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, как показывает опыт эксплуатации, доминирующими механизмами повреждений, разрушений и отказов могут быть:

- поверхностная коррозия;
- режим силового или термосилового нагружения;
- коррозионное растрескивание;
- деградация металла (ползучесть и др.);
- изменение химического состава металла;
- изменение механических свойств металла;
- напряжения различного рода в основном и наплавленном металле;
- концентрация напряжений в местах дефектов металла и соединений;
- агрессивность среды;
- потеря устойчивости и др.

Требования к организации работ, экспертное обследование и в целом техническая диагностика выполняются специализированными организациями, для которых такой вид деятельности предусмотрен Уставом.

Специализированные организации должны иметь:

- квалифицированных специалистов;
- аккредитованную контрольно-испытательную лабораторию с установленной областью технической диагностики (разрешение Проматомнадзора);
- необходимое диагностическое и контрольное оборудование;
- актуализированную нормативно-техническую документацию.

Подготовительные работы, выполняемые владельцем емкостного оборудования, для проведения диагностики показаны на рис. 1.

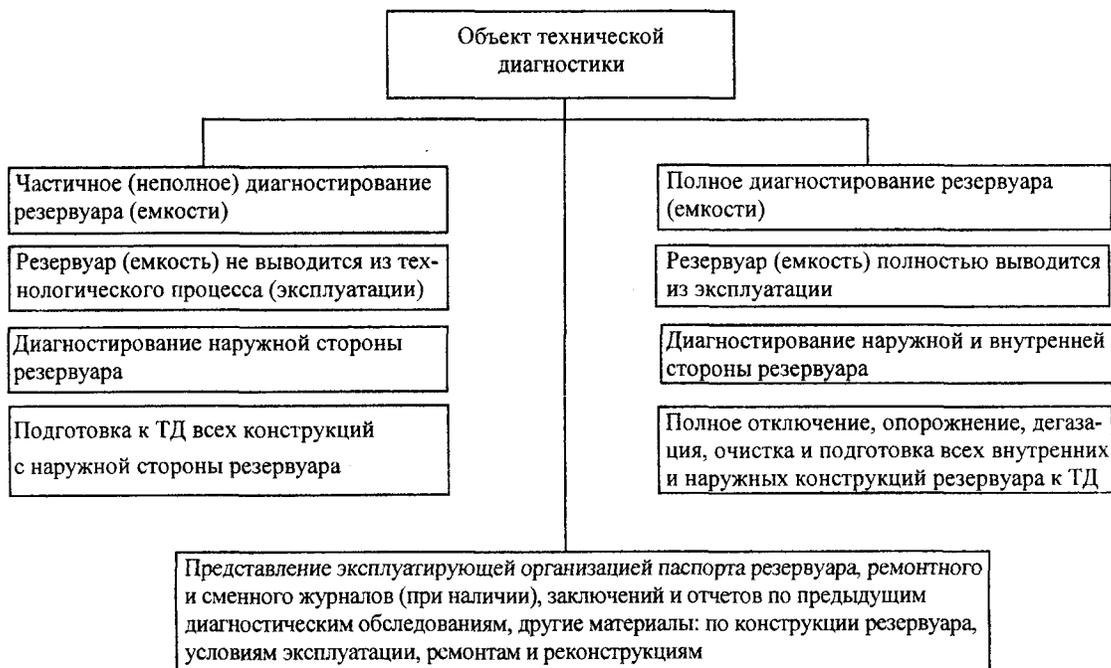


Рис. 1. Схема подготовки объекта к техническому диагностированию

Объем диагностических работ, контроля и испытаний определяется в зависимости от класса резервуара, его технического состояния, условий эксплуатации, а также по результатам ознакомления с проектной и эксплуатационно-технической документацией и записывается в «Программе ТД». Конкретный, унифицированный объем работ должен включать следующий минимально необходимый перечень:

1. Анализ проектной и эксплуатационно-технической документации.
2. Наружное и внутреннее обследование визуально-оптическим методом с оценкой состояния:
 - металла и сварных соединений днища;
 - фрагментов днища и упорных швов (сопряжение со стенкой и днищем);
 - металла стенки вертикальных и горизонтальных сварных соединений резервуара;
 - соединения люков, патрубков и их усиливающих листов на стенке и крыше резервуара;
 - металла и сварных соединений каркаса крыши, опорных колец, ребер жесткости;
 - металла и сварных соединений настила крыши (понтон);
 - металла и сварных соединений трубопроводов обвязки.
3. Оценку толщины металла основных элементов резервуара неразрушающими методами контроля.
4. Оценку сплошности металла и сварных соединений неразрушающим методом контроля (при необходимости определение физико-механических свойств металла).
5. Оценку геометрической формы.
6. Нивелирование днища, оценку его состояния.
7. Проведение расчетов на прочность и устойчивость.
8. Анализ результатов технического обследования.
9. Определение остаточного ресурса.
10. Оформление результатов технического диагностирования и расчетов остаточного ресурса.

Методы и средства, применяемые при технической диагностике. Основным методом, устанавливающим техническое состояние емкостного оборудования, является экспертное обследование, которое включает следующие наиболее важные элементы:

- 1) изучение (исследование) и анализ истории качества оборудования и эксплуатационно-технической документации;
- 2) исследование состояния наружных и внутренних поверхностей элементов оборудования;
- 3) измерение и оценку геометрической формы и устойчивости;
- 4) измерение и оценку толщины металла (толщинометрия);
- 5) дефектоскопию сварных соединений (швов) и основного металла;
- 6) измерение и оценку твердости металла несущих элементов;
- 7) оценку металлографических структур основного и наплавленного металла;
- 8) установление химического состава металла несущих элементов;
- 9) испытания на прочность и плотность путем нагружения (налива водой);
- 10) специальные методы контроля:
 - акустико-эмиссионный (АЭ) контроль;
 - термография;
 - тензометрирование;
 - магнитоанізотропного или метода магнитной памяти металла и др.

Конкретный объем работ, выполняемый при экспертном обследовании оборудования, определяет Программа обследования, разрабатываемой на основании истории качества, эксплуатационно-технической документации, конструктивных данных и данных оперативной информации.

Исследование технического состояния объекта

Наружный и внутренний контроль. Имеет целью выявление поверхностных и подповерхностных дефектов, образующихся в процессе изготовления, эксплуатации или ремонта обследуемых резервуаров, в том числе:

- поверхностные трещины;
- коррозионный и эрозионный износ;
- поры, выходящие на поверхность;
- расслоение металла;
- изменения геометрических форм основных несущих элементов;
- дефектов типа выпучен, вмятин, вздутий, гофров;
- дефектов сварных соединений;
- следы пропуска продукта и отпотевания на металле и сварных соединениях;
- нарушение целостности наружного и внутреннего защитных покрытий, изоляции;
- места возможного попадания воды, влажных паров на поверхность емкости из аустенитных сталей, из-за возможности образования в этих местах коррозионных трещин;
- наличие на внутренней и наружной поверхности вздутий на емкости, работающей в контакте с водородом или сероводородом;
- характер и интенсивность коррозионного образования.

Исследование поверхности металла производят с наружной, а затем с внутренней стороны резервуара в следующей последовательности:

- 1) крайка днища и нижняя часть первого пояса;
- 2) наружная и внутренняя части первого и второго поясов, а затем третьего, четвертого поясов (с применением переносной лестницы);
- 3) верхние пояса с применением подвесной люльки или с помощью оптических приборов;
- 4) места переменного уровня нефтепродуктов;
- 5) настил и несущие элементы кровли.

Исследование конструкций проводится с помощью визуально-оптического метода контроля с применением специальных средств освещения.

Надежность результатов осмотра необходимо повышать за счет очистки подозрительных участков поверхности абразивным инструментом, а в необходимых случаях - травлением поверхности.

При осмотре необходимо применять лупу с 10-кратным увеличением, переносные лестницы, подвесные люльки, адаптационные бинокли. В подозрительных местах обязательно применяется метод цветной или магнитопорошковой дефектоскопии. При осмотре фиксируют все виды дефектов, в том числе допустимые и недопустимые, и наносят их на карту осмотра с указанием размеров дефектов.

Результаты осмотра служат основой для назначения зон ультразвукового и рентгеновского контроля, зон толщинометрии, определения необходимости проведения контрольных замеров и оценки отклонений геометрической формы, для корректировки рабочей «Программы ТД».

Технический контроль и неразрушающие методы. Технический контроль металла и сварных соединений имеет целью выявление и измерение дефектов, образовавшихся при изготовлении и эксплуатации.

Технический контроль включает:

- контроль и измерение дефектов поверхности металла и сварных соединений;
- неразрушающие методы контроля;
- механические испытания;
- металлография, химический анализ металла и др.

Неразрушающие методы контроля позволяют определять наиболее важные характеристики состояния металла и сварных соединений:

- внутреннюю несплошность основного металла и сварных соединений, в том числе трещиноподобные и плоские дефекты;
- фактическую толщину металла элементов;
- напряженное состояние металла и сварных соединений;

При технической диагностике применяются:

- визуально-оптический (измерительный) контроль - VT;
- цветная дефектоскопия - PT;
- магнитопорошковый контроль - MT;
- рентгено- и гаммаграфия - RT;
- ультразвуковой контроль - UT и др.

Качество и достоверность технического контроля являются важнейшими показателями работы дефектоскописта, гарантией безопасности и предупреждения техногенных аварий, незапланированных остановок оборудования, защиты населения и окружающей среды. Вместе с тем в практике контроля имеют место ряд существенных нарушений и несовершенств, связанных с отсутствием нормативной документации на применяемые методы контроля; отсутствие методик определения уровня достоверности результатов контроля и оценки, что ведет к нарушениям различного рода и наиболее опасным. Достоверность выявления дефектов при наружном и внутреннем контроле достаточно низкая и составляет 60...70 % и менее.

Как показывает практика, в ряде случаев положительные результаты неразрушающего контроля не гарантируют безаварийную работу оборудования в межконтрольный период, так как эти методы устанавливают только отсутствие или наличие дефектов и не выявляют потенциально опасные зоны, напряжения в которых при эксплуатации могут вызвать микроразрывы с развитием до критических размеров. Поэтому в современной диагностике должны в обязательном порядке использоваться методы и приборы, определяющие состояние напряженности металла и сварных соединений, а диагностические лаборатории укомплектованы полным набором необходимого оборудования и специалистами.

Следует особо подчеркнуть, что каждый отдельный метод контроля и измерения или оценки параметра не обеспечивает полной картины состояния исследуемого объекта. Поэтому на практике необходимо применять комплекс методов и средств для оценки параметров технического состояния объекта.

В информационно-техническом центре по сварке и диагностике разработана комплексная система применения неразрушающего контроля в последовательности, указанной на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность применения неразрушающих методов контроля

При такой системе контроля повышается информативность, достоверность и объем выявляемых дефектов, что подтверждается исследованиями [7].

Для определения напряжений в основном металле или металле шва, а также установления появления и роста дефектов типа «трещина» назначается дополнительное исследование с помощью специальных методов контроля, например, метода магнитной памяти металла (ММП) в сочетании с неразрушающими методами в последовательности, указанной на рис. 3.

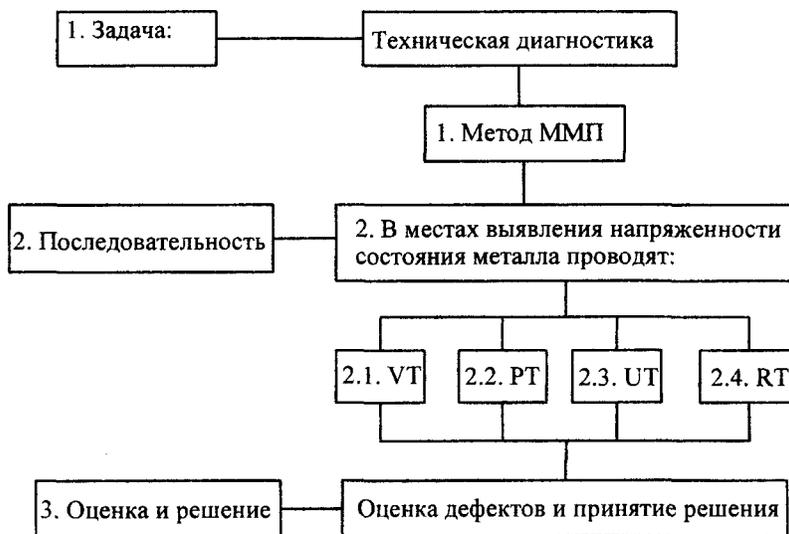


Рис. 3. Алгоритм контроля ММП в сочетании с неразрушающими методами контроля

Возможно решение обратной задачи по рис. 3, когда неразрушающий контроль (см. рис. 2) не выявляет дефектные места, а утечки продукта не прекращаются.

После оперативного анализа результатов контроля неразрушающими методами (рис. 2, 3) и установления неудовлетворительного состояния качества металла элементов резервуара, принимается решение об определении твердости металла (металлографии, химсостава).

При отрицательных результатах одного из дополнительных методов проводится исследование и оценка физико-механических свойств металла и сварных соединений с вырезкой образцов металла и сварного шва.

В практике эксплуатации резервуаров довольно часто создаются ситуации предаварийного состояния (утечка продукта, видимый разрыв металла или сварного соединения и др.). Для ликвидации предаварийного состояния разработан алгоритм быстрой диагностики с применением мобильной диагностической лаборатории (рис. 4).

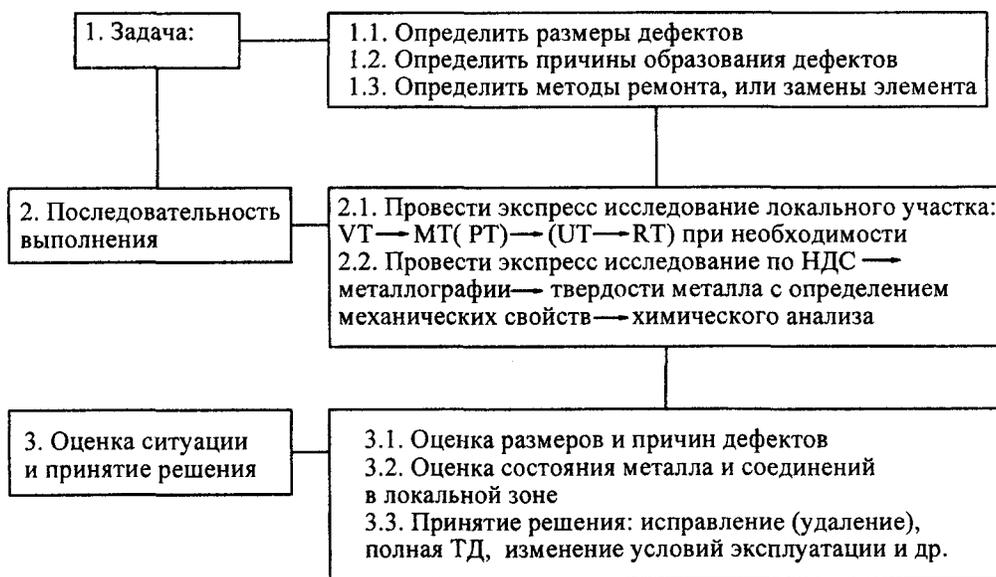


Рис. 4. Алгоритм проведения локальной экспресс-диагностики

Эффективность экспресс-диагностики напрямую зависит от применяемых экспрессных методов: акустической эмиссии (АЭ), магнитошумового метода (МШМ) или метода магнитной памяти металла (ММП), и других аналогичных приборов, предназначенных для выявления развивающихся (растущих) дефектов и зон концентрации напряжений в металле и сварных соединениях (НДС). При экспресс-диагностике контроль и оценка металлографических структур проводится без разрушения, методом реплик или просмотром с помощью мобильного микроскопа; измерение твердости переносными твердомерами с учетом реальных толщин и исследования поверхности, механические свойства металла определяются по величине твердости; химический анализ металла - с помощью переносного стилоскопа. Экспресс-диагностика позволяет в короткие сроки определять причины дефектов (разрушений) и устранять их последствия [8].

В данном разделе из-за ограниченности статьи не рассматриваются: оценка геометрической формы, обследования днища, упорного узла, крыши и понтона, тепловая изоляция резервуара и другие особенности.

Поверочные расчеты. Часть параметров резервуара (сосуда) определяют прочностными расчетами. После выполнения толщинметрии замеренные толщины листов металла сравниваются с браковочными, установленными для различных элементов резервуара.

Браковочная толщина листов для каждого пояса стенки резервуара устанавливается жестко, без каких-либо отклонений [2, 3]:

$$\delta_{\text{омб}} = \frac{(n_1 \cdot \gamma \cdot H_i + n_2 \cdot p) \cdot D \cdot K}{2 m \cdot R_H \cdot \varphi}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{омб}}$ – браковочная толщина листов, вычисленная для каждого пояса, м; $\gamma = \rho \cdot g$ – удельный вес хранимого продукта, МН/м³; ρ – плотность хранимого продукта, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; H_i – расчетная высота столба жидкости, м.

При условии равенства высот каждого пояса

$$H_i = H_H - (i-1) \cdot h_n, \quad (2)$$

где i – номер рассчитываемого пояса, $i = 1, 2, 3, 4, \dots, 8$; h_n – высота пояса резервуара, м; p – избыточное давление под кровлей резервуара, МПа; D – диаметр резервуара, м; φ – расчетный коэффициент прочности; K – коэффициент надежности по материалу ($K = 1,05$); R_H – нормативное сопротивление (МПа) прокатной стали, при наличии сведений о механических свойствах и химическом составе каждого листа рассматриваемого пояса в формулу отбраковки допускается подставлять $R_H = \sigma_{T_{\text{min}}}$.

Расчет стенки резервуара на прочность проводится с учетом требований СНиП II-23-81:

$$\sigma = \frac{[n_1 \rho \cdot (H_n - x) + n_2 P_u] \cdot r}{100 \cdot \delta} \leq m \cdot R_y^*, \quad (3)$$

где σ – напряжение в расчетном поясе резервуара, МПа; n_1 – коэффициент перегрузки по жидкости ($n_1 = 1,1$); ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³; H_n – установленная высота уровня налива нефтепродукта, м; x – расстояние от днища резервуара до расчетного уровня, м; n_2 – коэффициент перегрузки ($n_2 = 1,2$); P_u – нормативная величина избыточного давления под кровлей ($P_u = 0,2$ кПа); r – радиус резервуара (принять по проекту), м; δ – реальная толщина стенки резервуара в расчетном поясе, м; m – коэффициент условий работы (для 1-го нижнего пояса стенки $m = 0,7$; для всех остальных поясов $m = 0,8$); R_y^* – расчетное сопротивление стали по пределу текучести, МПа.

Осевые и кольцевые напряжения также проводятся с учетом нормативных требований [3, 4] и местных условий эксплуатации сосудов.

При оценке работоспособности объекта диагностики для всех элементов необходимо учитывать установленные запасы по прочности. Резервуар (емкость или цистерна) считается работоспособным, если его основные несущие элементы имеют запасы прочности не ниже установленных нормативными документами:

1) для статических условий нагружения по ГОСТ 14249-89:

- $n_T = 1,5$ – запас по пределу текучести;
- $n_B = 2,4$ – запас по пределу прочности;
- $n_{\text{длп}} = 1,5$ – запас по пределу длительной прочности;
- $n_n = 1,0$ – запас по пределу ползучести;

2) для малоцикловых условий нагружения по ГОСТ 25839-83:

- $n_N = 10$ – запас по числу циклов до разрушения;
- $n_\sigma = 2$ – запас по амплитудным напряжениям.

В случае если условия, предусмотренные в нормативных документах, не выполняются, решается вопрос о выбраковке резервуара или переводе его на работу с пониженными рабочими параметрами.

Определение остаточного ресурса. Определение остаточного ресурса проводится только для оборудования, техническое состояние которого по результатам экспертного обследования и исследования физико-механических свойств металла оценивается как удовлетворительное. Расчеты для каждого из основных несущих элементов оборудования осуществляются по установленному доминирующему механизму повреждения, определяющему степень истощения ресурса оборудования в процессе его эксплуатации. В качестве остаточного ресурса принимается минимальное значение ресурса.

Оценка ресурса элементов емкостного оборудования, эксплуатирующегося в условиях статического нагружения и основным повреждающим фактором для которого является общий коррозионно-эрозионный износ, выполняется по уравнению:

$$\Gamma = \frac{\delta_{\phi} - \delta_{\text{омб}}}{a}, \quad (4)$$

где Γ – расчетный ресурс, годы; δ_{ϕ} – фактическая толщина оцениваемого элемента, мм; $\delta_{\text{омб}}$ – браковочная толщина оцениваемого элемента, мм; a – скорость коррозии (эрозионного износа), мм/год.

Остаточный ресурс N_{oc} при малоцикловом нагружении резервуара определяют [3] как сумму циклов по двум стадиям циклического нагружения:

$$N_{oc} = N_o + N_p, \quad (5)$$

где N_o – число циклов до образования макротрещин; N_p – число циклов до образования лавинообразной трещины.

Образование трещин по линии сплавления связано с малочисловой усталостью при заполнении и опорожнении резервуара, вызванной угловыми деформациями.

Исследования, проведенные во ВНИИмонтажспецстрое, позволили на основании эмпирической зависимости Коффина – Менсона связать фактическую величину амплитуды деформации с допускаемым числом циклов нагружения. Такое положение распространяется на резервуары большой вместимости, объемов более 5000 м³.

Для пульсирующего цикла при $\sigma_{-1} = 0,4 \sigma_t$ зависимость имеет вид [2]:

$$[\varepsilon_a] = \min \left\{ \left[\frac{-\ln(1-\psi) + \frac{\sigma_{-1}}{1,4E}}{4[N]^2 + 1} \right] \frac{1}{\varphi n_{\varepsilon}}, \left[\frac{-\ln(1-\psi) + \frac{\sigma_{-1}}{1,4E}}{4(n_N)[N]^2 + 1} \right] \frac{1}{\varphi} \right\}, \quad (6)$$

где $[\varepsilon_a]$ – допустимая амплитуда деформации; $[N]$ – допускаемое число циклов нагружения; ψ – относительное сужение площади поперечного сечения образца при статическом растяжении; σ_{-1} – предел выносливости материала; E – модуль упругости; n_{ε} – запас прочности по деформации; n_N – запас прочности по долговечности; φ – коэффициент, учитывающий ухудшение свойств сварного соединения сравнительно с основным материалом.

По результатам технической диагностики составляется заключение с описанием полного перечня всех выполненных работ и результатами оценки остаточного ресурса на основные несущие элементы оборудования, с условиями, обеспечивающими его эксплуатацию.

Выводы

Анализ состояния технической диагностики выявил ряд существенных недостатков в ее организации и совершенствовании, в частности:

- наличие большого числа ведомственных нормативных документов (Россия, Украина) и отсутствие таковых в Республике Беларусь, что ставит вопрос о необходимости разработки единого научно-обоснованного документа;

- диагностическими службами различных предприятий не уделяется должного внимания разработке и составлению «Программ ТД». Диагностика часто проводится по ускоренным программам или без программ.

Проблемами технической диагностики являются:

- острый дефицит аттестованного персонала (как правило, отсутствует полный набор специалистов, аттестованных по каждому методу контроля и виду оборудования);
- недостаточность нормативной базы, регламентирующей проведение технической диагностики по видам оборудования;
- необеспеченность полным набором оборудования и средствами контроля для комплексного проведения работ по диагностике;
- отсутствие в ряде случаев квалифицированного руководства лабораториями и центрами технической диагностики;
- отсутствие инженерных школ диагностики, что ведет к снижению технического уровня специалистов - главных лиц, определяющих качество технической диагностики, способных оценивать состояние «работающего» металла и «созревание» будущих дефектов.

Необходимость решения указанных проблем очевидна, аварию легче предупредить, чем ликвидировать ее последствия. Важно выявлять места локально повышенных напряжений, концентрации напряжений, которые в конечном счете разряжаются трещиной и лавинообразным разрушением. Поиск такой трещины только методами дефектоскопии часто не дает результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтебазохимических производств: Обзор / ЦНИИТЭнефтехим. - М, 1998. - 210 с.
2. Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. - М.: Недра, 1955. - 135 с.
3. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров (РД-153-112-017-97).
4. СНиП П-23-81. Нормы проектирования. Стальные конструкции / Госстрой СССР. - М., 1998.
5. ИТН-93. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / НИКТИ нефтехимоборудование. - Волгоград, 1999.
6. ПМГ 15-96. Требования к компетентности лабораторий неразрушающего контроля и технической диагностики.
7. Денисов Л.С., Дроздовский Н.А. Техническая диагностика емкостного оборудования, его восстановление, проблемы и достижения // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики. Состояние объектов: Материалы междунар. конф. - Могилев: БРУ, 2004. - С. 194 - 196.
8. Пантелеенко Ф.И., Котов В.Е. Диагностирование объектов повышенной опасности // Вестник Полоцкого гос. ун-та. - 2004. - № 12. - С. 35 - 43.