

УДК 621.01:539.3

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ

Бледнова Ж. М.¹, Вотинов А. В.²

EVALUATION OF SAFETY PARAMETERS OF RESERVOIRS FOR PETROLEUM PRODUCTS STORAGE IN CASE OF DEFECTS

Blednova Zh. M., Votinov A. V.

Based on the analysis of research works on the problem of destruction of reservoirs for petroleum products storage, the paper discusses issues of reliability, destruction risks and forecasting of residual life of structures exposed to combine actions of corrosion media and repeated loading taking into consideration operational defects.

В условиях объективной невозможности полного исключения повреждений потенциально опасных объектов, к числу которых относятся резервуары для хранения нефтепродуктов и технологические трубопроводы, степень безопасности эксплуатации определяется угрозами масштабных разрушений, взрывов, пожаров, загрязнений почвы и водоемов при утечке нефтепродуктов. Анализ статистики аварий на объектах по хранению и транспортировке нефти и нефтепродуктов свидетельствует о низких фактических уровнях безопасности. В качестве причин разрушения указываются дефекты конструкций металлургического, технологического и эксплуатационного характера (низкое качество металла, дефекты сварки, монтажные дефекты). Наиболее частыми видами отказов резервуаров является коррозионный износ и изменение геометрической формы (рис. 1). Статистические оценки вероятности таких аварий для резервуаров и трубопроводов составляет соответственно $1,6 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-4}$ 1/(резервуар-год) и $1,3 \cdot 10^{-3} - 5,6 \cdot 10^{-4}$ 1/км-год [1–3].

Проведенный анализ опубликованных работ по проблеме отказов оборудования (резервуаров для хранения нефтепродуктов, технологических трубопроводов и компенсационных систем) и собственные исследования на основе использования актов технического со-

стояния по результатам обследования морского терминала, выполненного лабораторией технадзора и диагностики оборудования ОАО «НК „Роснефть-Туапсенефтепродукт”», заключений экспертизы промышленной безопасности Ростехнадзора России управления Северо-Кавказского округа позволили выделить основные факторы металлургического и эксплуатационного происхождения, определяющие его работоспособность и безопасную эксплуатацию [4]. Гистограмма распределения отказов объектов морского терминала в различные периоды эксплуатации представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, полное время эксплуатации резервуаров парка можно разделить на три периода: период приработки (с 1975 по 1981 гг.), период нормальной эксплуатации (с 1981 по 1993 гг.) и период интенсивного износа (с 1993 г.). В период приработки интенсивность отказов велика, так как в конструкциях технологических объектов возникает большое количество монтажных и технологических дефектов. После того, как дефекты были устранены путем ремонта или полной замены элементов конструкции, уровень интенсивности отказов установился постоянным и наступил период стабильной эксплуатации. После 18 лет эксплуатации резервуарного парка начинает сказываться износ элементов технологической системы. С этого времени начи-

¹Бледнова Жесфина Михайловна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой динамики прочности машин Кубанского государственного технологического университета.

²Вотинов Андрей Валерьевич, первый заместитель генерального директора, технический директор ОАО «НК „Роснефть” – Туапсенефтепродукт».

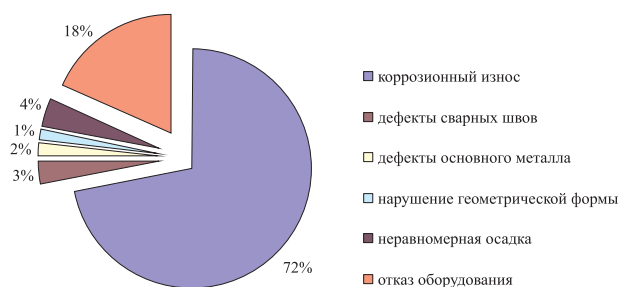


Рис. 1. Статистика отказа резервуаров

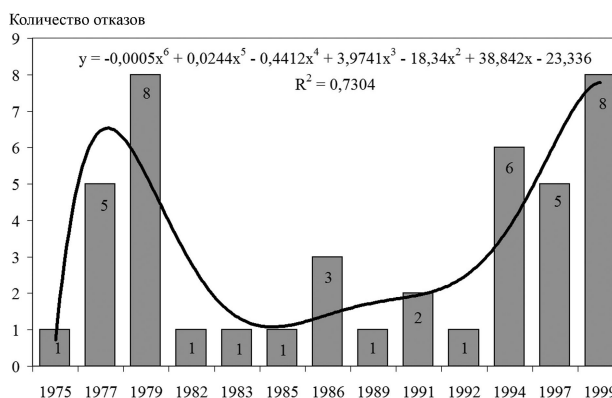


Рис. 2. Зависимость степени износа корпусов резервуаров во времени

нается период интенсивного износа конструкций с резким ростом интенсивности отказов и особенно актуальной становится задача оценки эксплуатационного риска.

Основными причинами отказов являются:

- коррозионный износ днища резервуаров, как изнутри, в среде подтоварной воды, так и снаружи из-за нарушения гидрофобного слоя основания днища и нижних поясов стенки резервуара;

- дефекты сварных соединений и искажение формы стенки из-за низкого качества монтажа или неправильного выполнения основания;

- неравномерные осадки и локальные просадки основания;

- особенности воздействия климатических условий (терминал расположен в курортной зоне Краснодарского края) как низкой температуры, способствующей хрупкому разрушению (абсолютный минимум температур в районе производственной площадки терминала — минус 19°C), так и повышенной температуры (абсолютный максимум температур — плюс 39°C), в сочетании с высокой влажностью, способствующей ускоренному протеканию коррозионных процессов.

Одним из наиболее распространенных дефектов является местный коррозионный износ корпуса резервуара. Резервуары на промыслах, на нефтеперерабатывающих заводах и нефтеперекачивающих станциях, предназначенные для хранения нефти и нефтепродуктов, подвергаются воздействию различных коррозионных сред. Резервуары, хранящие угленосную нефть, имеют значительные коррозионные повреждения в нижней части оболочки, где соленая пластовая вода, осаждающаяся из нефти, вызывает коррозию днища и

нижней части первого пояса. В резервуарах, где хранятся бензины, сильно и равномерно корродируют верхние пояса, которые в отличие от нефтяных резервуаров, больше контактируют с кислородом воздуха (рис. 3а) [5]. Нижний пояс и днище подвержены местной коррозии в виде прерывистых полос шириной до 100 мм и длиной от 0,5 до 2 мм. Во многих случаях имеют место коррозионные трещины и расслаивания металла из-за наводороживания. Зафиксированы также случаи коррозионного растрескивания сварных соединений (рис. 3б). Основной причиной возникновения и развития коррозионных дефектов является неудовлетворительное состояние изоляции. Старение лакокрасочных покрытий под действием эксплуатационных факторов сопровождается образованием различного рода дефектов [6] (пузырей, трещин, отслоений покрытия), которые интенсифицируют коррозионный процесс (рис. 3в, 3г, 3е).

В последние десятилетия часть оборудования простаивала без консервации, что привело к его усиленной коррозии. На рис. 4 приведен график зависимости коррозионного износа корпуса резервуара от продолжительности эксплуатации при хранении различных нефтепродуктов, полученный на основании фактических материалов и показывающий предельный срок эксплуатации.

Таким образом, анализ технического состояния резервуаров позволил выявить опасные, с точки зрения возможности возникновения аварии, дефектные места, факторы, влияющие на качество основного металла и сварных соединений. Это подтверждает актуальность проведения исследований по оценке параметров безопасности при эксплуатации резервуаров для хранения нефтепродук-

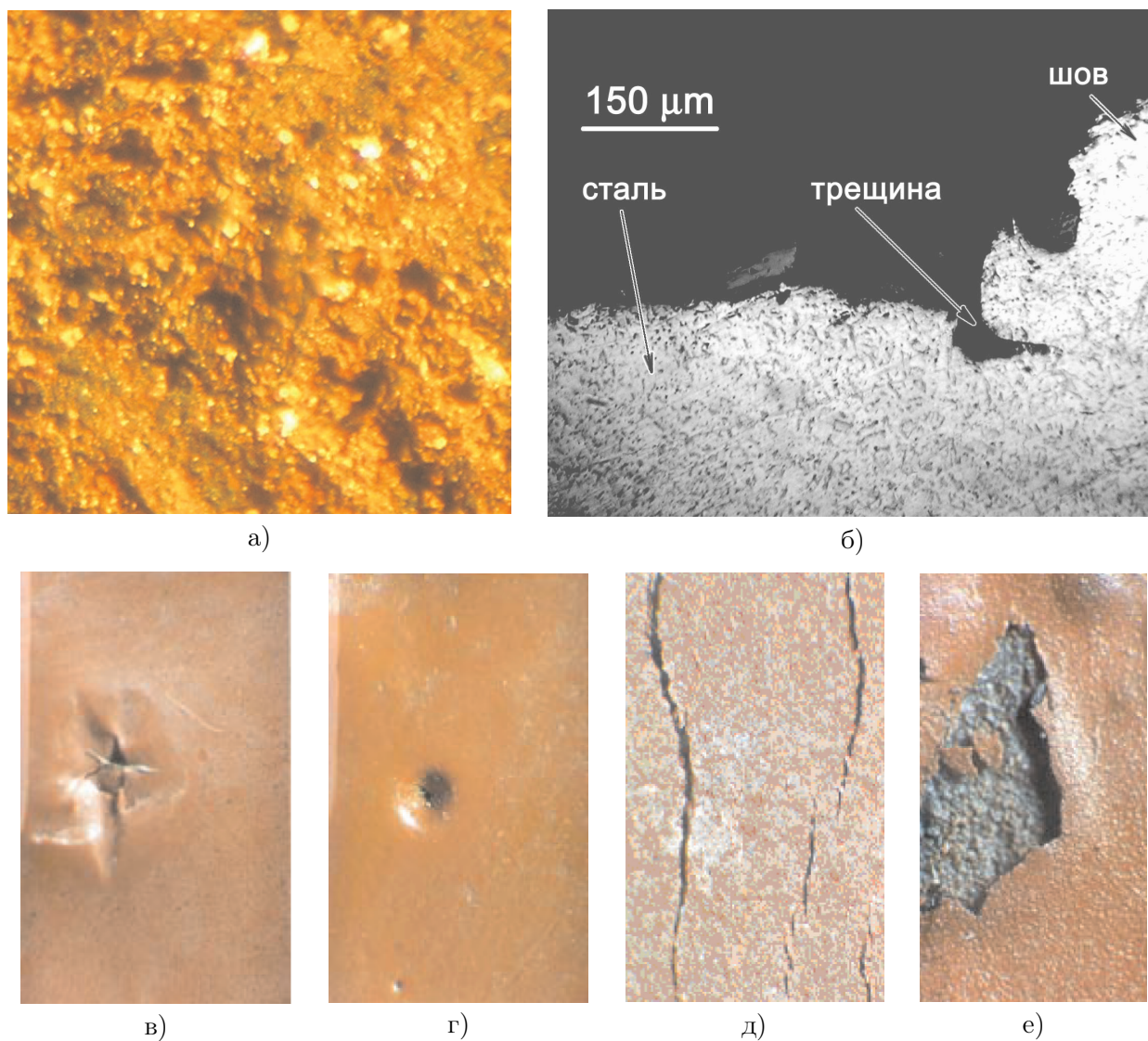


Рис. 3. Виды дефектов внутренней поверхности резервуаров после различных сроков эксплуатации:
 а — коррозионное поражение крыши (15 лет); б — коррозионная трещина у основания сварного шва;
 в — отслоение покрытия (3 года); г — пузырь (1 год); д — трещины в покрытии (1,5 года); е —
 разрушение покрытия, вызванное подпленочной коррозией (5 лет)

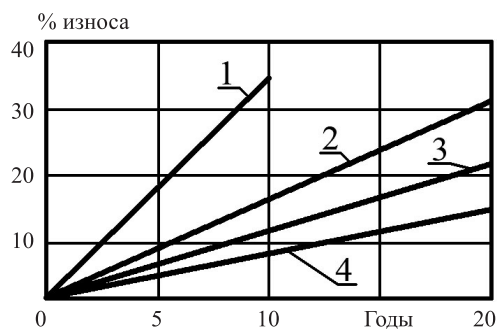


Рис. 4. Коррозионный износ стальной оболочки корпуса резервуара в зависимости от срока эксплуатации и вида хранимого продукта

тов. В последние годы повышение требований к долговечности резервуаров возрастает в связи с увеличивающейся напряженностью работы объектов по хранению и транспортировке нефтепродуктов и повышающейся коррозионной активностью транспортируемой продукции и внешней окружающей среды.

Несмотря на большое количество опубликованных работ в области увеличения долговечности и безопасной эксплуатации металлоконструкций, подверженных коррозионно-механическому разрушению [5, 7, 8], задача прогнозирования разрушения конструктивных материалов и изделий из них в коррозионной среде до конца не решена. Открытым остается вопрос степени опасности того или иного вида структурной поврежденности для образования и развития конкретного вида микродефекта, либо снижения механических свойств до недопустимых значений, когда даже незначительный микродефект может привести к разрушению. Поэтому для объективной оценки надежности и остаточного ресурса резервуаров и технологических трубопроводов необходимо: обеспечение комплексного мониторинга технического состояния; совершенствование методов и средств неразрушающего контроля металла, особенно сварных соединений; разработка практически приемлемых методов оценки остаточного ресурса. Для увеличения остаточного ресурса необходима разработка конструктивно-технологических способов повышения долговечности металлоконструкций, работающих в условиях воздействия коррозионных сред.

Обеспечение безопасности резервуаров и технологических трубопроводов в условиях возможности усталостных и коррозионно-усталостных разрушений заключается в определении допускаемого числа циклов нагружения $[N]$ с учетом коэффициентов запаса по долговечности γ_N и амплитудам напряжений γ_σ

$$[N] = \frac{N_c(\sigma_a)}{\gamma_N}, \quad [\sigma] = \frac{\sigma_{af}}{\gamma_\sigma},$$

где N_c , σ_{af} — разрушающее число циклов и амплитуда напряжений.

Нормативная долговечность для конструктивных сталей широкого применения может быть определена по обобщенным диаграммам усталости [2]. Численные значения коэффициентов запаса γ_N устанавливаются с учетом типа конструкции и условий эксплуатации [2]. Для резервуаров и трубопроводов рекомендуется $\gamma_N = 10$; $\gamma_\sigma = 2$.

Эффекты коррозионных воздействий учитываются в зависимости от типа коррозии, характера коррозионной среды и длительности коррозионного воздействия. Расчетная долговечность в условиях общей коррозии может быть определена по формуле

$$N = N_c (1 - k_s \lg N_c),$$

где k_s — коэффициент, учитывающий влияние среды (0,02–0,1).

Наиболее опасные виды отказов оборудования по хранению и транспортировке нефтепродуктов связаны с образованием дефектов в очаговой зоне разрушения под воздействием факторов эксплуатационного характера (действия коррозионной среды, циклического нагружения, температуры), усложненных дефектами металлургического происхождения, монтажными дефектами формы и технологическими дефектами структуры и формы. Это побуждает к детальному рассмотрению технической задачи оценки параметров безопасности и остаточного ресурса при наличии локальных фактически зарегистрированных дефектов.

Коррозионные дефекты развиваются во времени. Развитие это происходит неравномерно и с разными скоростями, на некоторых участках весьма значительными — до 1 мм в год. По данным [1] число дефектов, для которых зафиксирован рост коррозии в глубину стенки, составляет 10 % от общего количества обнаруженных дефектов. Одним из основных факторов формирования и развития аварийной ситуации при эксплуатации резервуаров со сформировавшимися дефектами является напряженно-деформированное состояние (НДС) с учетом локальных повреждений. Аварийная ситуация при эксплуатации стального вертикального цилиндрического резервуара (РВС) с локальными повреждениями существенно меняет параметры НДС, не учитываемые аналитическими методами. Поэтому актуальной является задача численного исследования НДС резервуаров, учитывающая геометрические размеры дефекта.

С помощью оптико-механического тепловизора методом сканирующей пирометрии в нижнем поясе РВС 20 000 м³ была обнаружена коррозионная язва, термограмма которой представлена на рис. 5а. Численное моделирование этого дефекта производилось в среде NASTRAN. Влияние дефектов стенки на НДС резервуара выражалось через концентрацию напряжений. Анализ показывает, что макси-

мальный коэффициент концентрации напряжений при наличии указанного дефекта достигает значения 1,65. Совершенно очевидно, что для обеспечения безопасности конструкций необходимо помимо существующих предельных состояний ввести расчеты по предельным состояниям с учетом ненормированных повреждений, в частности с учетом образования и развития поверхностных дефектов.

Расчет НДС поврежденных резервуаров позволяет оценить НДС фактически зарегистрированных эксплуатационных повреждений, прогнозировать развитие повреждения с учетом эксплуатационных факторов и характера нагружения, рассмотреть возможности конструктивного усиления или ремонта с целью снижения параметров НДС до уровня, обеспечивающего безопасную эксплуатацию в течение проектного или остаточного срока эксплуатации. Моделирование НДС при наличии эксплуатационных повреждений на различных этапах развития аварийной ситуации относится к задачам прочностного анализа нового типа, возникшим вследствие повышенных требований к безопасности, живучести, надежности и ресурсу технических систем. Начальный этап моделирования аварийной ситуации — определение НДС, после чего необходимо моделировать кинетику повреждений с учетом изменения свойств материала поврежденной зоны.

Обеспечение прочности и на стадии «живучести» конструкции может осуществляться с использованием диаграмм циклической трещиностойкости при малоцикловом нагружении. Живучесть конструкции обеспечивается при обеспечении запасов по числу циклов γ_N и по длине трещины γ_l

$$[N] = \frac{N_l(\sigma_a)}{\gamma_N}, \quad [l] = \frac{l_c}{\gamma_l},$$

где N_l — число циклов до разрушения; l_c — критический размер трещины.

Для обеспечения безопасности объектов нефтехимического комплекса значение коэффициентов запаса рекомендуется устанавливать в пределах $\gamma_N = 3 \div 10$ и $\gamma_l = 2 \div 5$ в зависимости от условий нагружения [2]. В настоящее время систематический опыт оценки живучести резервуаров и трубопроводов пока отсутствует. Для решения задачи обеспечения безопасности таких потенциально опасных объектов как резервуары необходим вероятностный подход с оценкой функции безопасности $H(t)$ и функции риска $R(t)$. Условие безопасности с

использованием функции риска имеет вид

$$R(t) \leq [R],$$

$[R]$ — нормативный (приемлемый) риск.

Сложность оценки риска резервуаров и трубопроводов заключается в ограниченности наличия вероятностных моделей нагрузок, воздействий, расчетных характеристик материалов, геометрических размеров элементов и нормированной величины $[R]$. Первые результаты по оценке ресурса с использованием вероятностных моделей нагрузок и дефектности сварных соединений приведены в работах [2, 9].

При определении приемлемого риска должен учитываться как экономический, так и экологический аспект. По экономическим соображениям, избыточная (сверх необходимой) надежность приводит к завышению капитальных затрат на изготовление конструкций, а недостаточная — к снижению капитальных затрат и росту вероятности аварии с экологическим ущербом природно-лечебным и рыбным ресурсам Черноморского побережья, к огромным эксплуатационным расходам на локализацию, сбор и удаление загрязнений, а также на производство ремонтно-восстановительных работ. Отсюда очевидно, что оптимальный уровень надежности конструкций следует определять исходя из минимума суммарных затрат. При экономическом анализе помимо капитальных первоначальных и эксплуатационных затрат необходимо также учитывать убытки от временного прекращения нормальной эксплуатации технологических объектов (потери от нарушения ритма снабжения потребителя нефтепродуктом), от сокращения или полного прекращения транспортных и сливо-наливных операций (для магистральных трубопроводов, железнодорожных составов, танкеров и барж) и затраты на производство ремонтно-восстановительных работ.

Целью поисков является не максимально возможная надежность, а нахождение оптимального компромисса между суммарными затратами и надежностью. Очевидно, что результаты этого компромисса зависят от государственной важности объекта, технологии эксплуатации, величины ущерба, степени риска. Таким образом, при определении оптимального уровня надежности с экономической точки зрения для каждого вида отказа должен быть установлен убыток или ущерб, причиняемый этим отказом. Зная вероятность по-

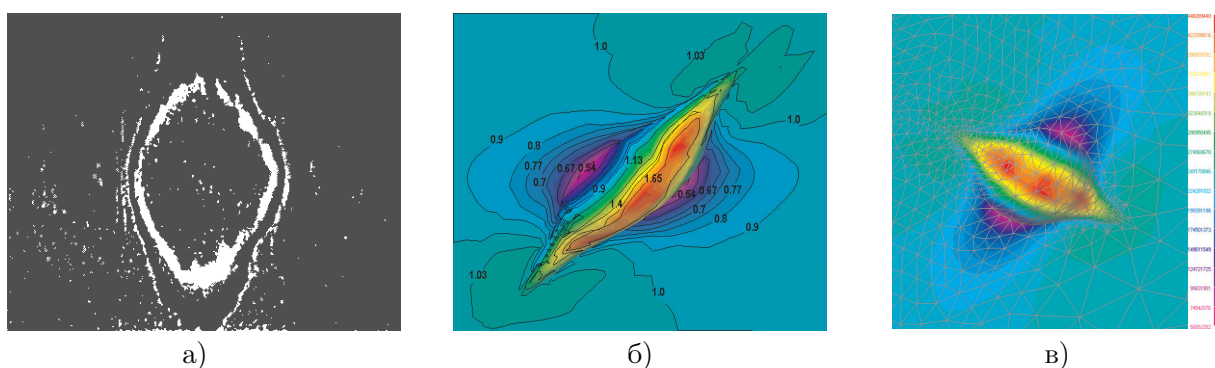


Рис. 5. а — термограмма коррозионного дефекта стали в нижнем поясе резервуара (масштаб: 1:1, снимок получен на расстоянии 3 метров от корпуса резервуара); б — конечно-элементная модель дефекта; в — линии равного уровня условного коэффициента концентрации напряжений

явления отказов, можно определить ожидаемую величину общего ущерба и в сочетании с первоначальной стоимостью конструкции найти оптимальные коэффициенты запаса и степень приемлемого риска. Такой подход получил значительное развитие в последнее время.

Рассмотрим пример определения уровня надежности и экологического риска эксплуатации РВС вместимостью 20 000 м³ из стали 09Г2С. В результате натурных измерений деформаций и напряжений в зоне дефекта (рис. 5а) в течение длительного времени наблюдения при самом неблагоприятном сочетании нагрузок и статистической обработки результатов измерения при объеме выборки $n = 18$ математическое ожидание «внешнего» фактора Y_2 — максимального напряжения — изменялось от $m_{Y_2} = 250$ МПа до $m_{Y_2} = 450$ МПа. Статистическое математическое ожидание «внутреннего» фактора Y_1 — предел прочности стали 09Г2С из испытания на растяжение составил $m_{Y_1} = 470$ МПа при объеме выборки 25. Среднеквадратическое отклонение «внешнего» и «внутреннего» факторов получились равными: $\sigma_{Y_1} = 20$ МПа; $\sigma_{Y_2} = 80$ МПа.

Расчет величины экологического риска R и уровня надежности H в зависимости от степени коррозионного износа и величины максимальных напряжений в области дефекта выполнены по методике [9] с использованием программного продукта MathCAD (рис. 6). Ущерб природно-лечебным ресурсам и рыбным запасам в случае возможной аварии из-за разрыва оболочки резервуара в области дефекта и попадания около 20 тыс. т нефтепродукта в море равен соответственно $U = 2,5 \cdot 10^5$ \$ и $y = 7,8 \cdot 10^5$ \$.

Из графиков (рис. 6) видно, что уровень надежности РВС резко падает по мере возрастания уровня напряжений в области коррозионной язвы. В бездефектной области нижнего пояса резервуара, где действуют напряжения, соизмеримые с расчетной величиной на стадии проектирования, уровень надежности равен 0,996. С появлением коррозионной язвы и дальнейшим развитием процесса коррозии интенсивность реально действующих напряжений в области дефекта стремительно растет, а уровень надежности конструкции резко падает. Пропорционально этому растет величина экологического риска. С ростом напряжений и снижением уровня надежности конструкции экологический риск эксплуатации РВС с дефектом резко повышается от \$3 000 при $\sigma = 250$ МПа до \$325 000 при $\sigma = 450$ МПа.

Для оценки остаточного ресурса наряду с вероятностными методами используется и метод экспертных оценок. Для осуществления такой оценки предлагается одновременно с пуском в эксплуатацию резервуара для хранения нефтепродуктов пустить в эксплуатацию предложенную и запатентованную установку для исследования длительной прочности и малоциклового усталости, которая работает в том же режиме и в той среде, что и резервуар [10, 11]. Периодически снимая образцы и проводя металлографические и рентгеноструктурные исследования, можно оценить уровень повреждаемости материала стенок резервуаров. Кроме того, уровень повреждаемости может оцениваться относительным числом циклов при циклическом нагружении или относительной деформацией при длительном статическом нагружении в условиях ползучести

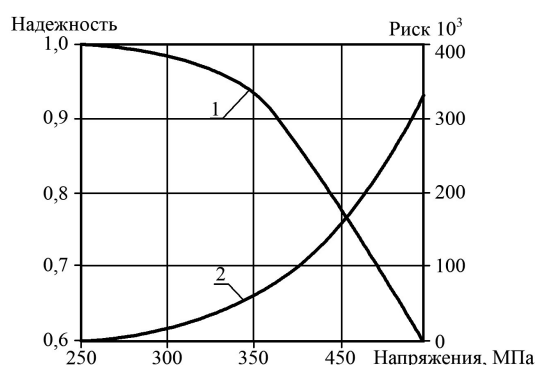


Рис. 6. Надежность и экологический риск при наличии дефекта

$$D_N = \int_0^N \frac{dN}{N_c(e_a)} \leq D_c, \quad D_t = \int_0^t \frac{e_t}{e_c} dt \leq D_c,$$

где N_c — разрушающее число циклов нагружения; e_c — разрушающая деформация; e_a , e_t — деформации при нагрузке; D_c — критические уровни повреждений.

Для обеспечения безопасности конструкций наряду с критическими повреждениями вводятся допустимые повреждения $[D]$ с учетом коэффициентов запаса. Уровни D_c и $[D]$ разделяются на области безопасной эксплуатации, ограниченной безопасностью и опасности риска. Область ограниченной опасности и риска разделяется точкой деструкции, которая может быть определена на основе упругопластического деструкционного анализа [12].

Выводы

В целях обеспечения безопасности конструкций резервуаров для хранения нефтепродуктов необходимо помимо существующих предельных состояний ввести расчеты по предельным состояниям с учетом ненормированных повреждений: образования и развития поверхностных дефектов, существенных локальных изменений механических свойств конструкционных материалов. В среде NASTRAN предложен электронный образ эксплуатационного дефекта в виде питтинга. Численные исследования указывают на возможность моделирования реальных ситуаций, возникающих при эксплуатации резервуара и разработки критерия опасного состояния с целью достижения безопасного и экономически обоснованного режима эксплуатации.

Для оценки уровня повреждаемости материала конструкции и остаточного ресурса предложено использовать метод экспертных оценок, заключающийся в исследовании образцов-свидетелей, которые работают в том же режиме, что и исследуемая конструкция. Это позволит определить точку деструкции, разделяющую область ограниченной безопасности и безопасности риска.

Литература

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта. М.: Знание, 2002. 750 с.
2. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. 493 с.; Ч. 2. 609 с.
3. Кузнецов В. В., Кандаков Т. П. Проблемы отечественного резервуаростроения // Промышленное стр-во. 1995. №5. С. 17–19.
4. Поправка Д. Л., Вотинков А. В., Тетюцкий Е. Ю. Статистический анализ причин аварийности, возникающих отказов и дефектов резервуаров, длительно работающих с нефтепродуктами // Современные материалы и технологии: Материалы Междунар. науч. техн. конф. Пенза, 2002. С. 132–135.
5. Бледнова Ж. М., Вотинков А. В., Чаевский М. И. Коррозия оборудования морского терминала, длительно работающего с нефтепродуктами // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф. (24–26 мая 2005, г. Ялта). Киев, 2005. С. 35–38.
6. Алексеева Н. А. Повышение защитных свойств и долговечности эпоксидно-оксилиновых покрытий путем совершенствования состава и структуры. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 24 с.
7. Горицкий В. М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 399 с.

8. Морозов Г. И., Башкарев А. Я., Веттегрень В. И. Кинетика коррозионного разрушения конструкционных сталей // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Тр. VI Междунар. конф. С.-Петербург, 2005. С. 316–323.
9. Лепихин А. М., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Черняев А. П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 173 с.
10. Патент ПМ № 49265. Установка для испытания на длительную прочность и малоцикловую усталость / А. В. Вотинов, Ж. М. Бледнова, М. И. Чаевский, Д. А. Стрелевский. Приоритет от 2005.03.18.
11. Бледнова Ж. М., Вотинов А. В., Чаевский М. И. Способ оценки остаточного ресурса резервуаров для хранения нефтепродуктов. Физическое материаловедение: Тез докл. II Междунар. школы. Тольятти, 2006. С. 87.
12. Патент 2261436. Способ оценки ресурса работоспособности металла / Л. М. Рыбакова, Б. Я. Сачек. Приоритет от 2004.06.28.

Статья поступила 17 января 2006 г.

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

ОАО «НК „Роснефть” – Туапсенефтепродукт», г. Туапсе

© Бледнова Ж. М., Вотинов А. В., 2006