

О влиянии технологии изготовления на несущую способность стальных резервуаров

В. С. Гудрамович^а, А. Ф. Деменков^а, Е. А. Егоров^б, А. В. Репринцев^а

^а Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск, Украина

^б Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск, Украина

Рассмотрены стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Исследовано влияние отклонений геометрической формы и разнотолщинности стенок, трещиновидных дефектов в сварных швах на прочностную работоспособность.

Ключевые слова: резервуары, технология изготовления, дефекты, несущая способность.

Рассматриваются некоторые аспекты влияния технологических дефектов стальных резервуаров на их несущую способность и долговечность. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары – это наиболее распространенный вид нефтехранилищ наземного типа во всех развитых странах мира. Такие сооружения оснащены разнообразными технологическими устройствами и по сути являются оборудованием, входящим в состав технологического комплекса, предназначенного для хранения нефтепродуктов и осуществления операций их приема и выдачи.

В данной работе резервуары рассматриваются только как строительная конструкция, которая должна обеспечивать надежное выполнение своих эксплуатационных функций (хранение нефтепродукта) в течение определенного временного периода (нормативный срок службы). Исходя из этого, отказы резервуара связываются в данном случае с выполнением требований по обеспечению прочности, устойчивости и герметичности.

Основным несущим конструктивным элементом резервуара является вертикальная цилиндрическая стенка. Диапазоны размеров резервуаров: диаметр от 10 до 90 м, высота от 7,5 до 22,5 м, отношение радиуса R к толщине h колеблется в пределах от 1000 до 2500 и более. Цилиндрическая стенка собирается из отдельных листов, соединяемых между собой сварными швами (в частности, наиболее распространены размеры листов $6 \times 1,5$ м, 8×2 м). Резервуары рассматриваемого вида имеют плоское днище и коническую или сферическую кровлю (крышку).

Основной эксплуатационной нагрузкой для таких сооружений является внутреннее давление хранимого нефтепродукта, которое в процессе эксплуатации может изменяться, что позволяет считать эту нагрузку циклической. Под воздействием нагрузки обширная часть поверхности резервуара (металл со сварными соединениями) оказывается в поле растягивающих напряжений. При этом даже малые ослабления способны вызвать в таких условиях

глобальное разрушение всей конструкции, что наблюдалось на практике, в частности, в 40–50-х годах прошлого столетия.

Технология изготовления резервуаров неизбежно приводит к появлению дефектов различного вида (дефекты геометрии цилиндрической стенки; дефекты сварных швов; дефекты, связанные с изменением толщины в результате технологических операций прокатки при изготовлении листовых заготовок и др.). Эти дефекты могут в значительной степени определить эксплуатационные качества стальных резервуаров и должны учитываться при определении проектных параметров конструктивных элементов резервуаров и при диагностических оценках их технического состояния и остаточного ресурса [1–4].

Распространенными дефектами геометрии цилиндрической стенки для реальных резервуаров являются локальные вмятины и выпучины со стрелой начального прогиба f_0 от $(1–5)h$ до $(10–20)h$ и более. Аналитически геометрическая форма цилиндрической стенки с отклонениями может быть представлена в виде рядов Фурье. В полученных зависимостях наибольшие коэффициенты имеют члены рядов, соответствующие 2–6, реже 8–10 гармоникам. Соответствующие отклонения формы не совпадают с критическими гармониками, которые адекватны форме потери устойчивости, и, как правило, применительно к рассматриваемым конструкциям не являются опасными. Поверхность резервуаров, изготовленных методом рулонирования, может иметь и более коротковолновые отклонения, соизмеримые с 90–150 гармониками. Прогибы таких отклонений составляют $f_0 = (0,2–1,0)h$. Наличие их в цилиндрической стенке обуславливают возникновение окружных изгибающих моментов и изгибных напряжений, которые, накладываясь на кольцевые растягивающие напряжения основного напряженного состояния, приводят к более раннему появлению пластических зон деформирования на отдельных участках цилиндрической стенки. В наибольшей степени такие отклонения опасны на линии опирания цилиндрической стенки на днище. Это может сопровождаться возрастанием крайних изгибающих моментов в 1,5 раза и более. Указанные выше дефекты геометрии являются типичными и их трудно избежать для принятой технологии изготовления рассматриваемых резервуаров.

Разработаны расчетные методики, позволяющие на основе реальных геометрических дефектов оценивать прочность и деформативность резервуаров.

При учете несовершенств формы каждый отдельный пояс цилиндрической стенки резервуара рассматривается как отдельная оболочка, нагруженная внутренним давлением p . При этом учитываются реальные граничные условия: соседние части резервуара принимаются как некоторое эквивалентное упругое основание с жесткостью c (в [2] жесткость соседних поясов во внимание не бралась).

Начальное несовершенство формы представляется в виде

$$w^0 = f_0^0 + \sum_{n=1}^N \left(f_n^0 \cos \frac{ny}{R} + u_n^0 \sin \frac{ny}{R} \right), \quad (1)$$

где

$$f_0^0 = \frac{1}{2\pi R} \int_0^{2\pi R} \bar{w}^0(y) dy; \quad f_n^0 = \frac{1}{\pi R} \int_0^{2\pi R} \bar{w}^0(y) \cos \frac{ny}{R} dy;$$

$$u_n^0 = \frac{1}{\pi R} \int_0^{2\pi R} \bar{w}^0(y) \sin \frac{ny}{R} dy;$$

$\bar{w}^0(y)$ – данные замеров начальных радиальных прогибов.

Максимальная величина изгибающих напряжений в рассматриваемой части резервуара, появившихся из-за наличия начальных прогибов на поверхности оболочки

$$\sigma_{\max}^{\text{изг}} = \frac{6M_{p,\max}}{h^2}, \quad (2)$$

где $M_{p,\max}$ – максимальное значение изгибающего момента M_p ;

$$M_p = pR \sum_{n=2}^N \frac{f_{nc}^0 \cos \eta_n y + f_{ns}^0 \sin \eta_n y}{1 + 12\bar{p}\bar{\xi}^3(n^2 - 1)^{-1} + 12\bar{c}_n\bar{\xi}^3\zeta(n^2 - 1)^{-2}};$$

$\bar{p} = \frac{p}{E}$; $\bar{\xi} = \frac{R}{h}$; $\zeta = \frac{R}{b}$; $\bar{c}_n = \frac{c_n}{E}$; b – высота пояса; c_n – жесткость упругого основания, соответствующая n -й гармонике в разложении прогиба w , определяется при решении контактной задачи сопряжения выделенного пояса с соседними частями оболочки резервуара.

При вычислении M_p использованы результаты решения задач контактного взаимодействия для оболочечных конструкций [5].

На рис. 1 приведены результаты, характеризующие отношение величины окружных изгибных напряжений, полученных по методике, учитывающей влияние на деформирование выделенного пояса отброшенных частей резервуара σ_c , к соответствующим напряжениям σ_0 , при вычислении которых влияние отброшенных частей не учитывается. Расчеты проведены для резервуаров с параметрами $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см², $R = 1200$ см, $h = 1$ см, уровень налива 1200 см, x – расстояние от основания резервуара до центра вмятины. Кривая 1 соответствует оболочке с регулярным начальным прогибом при $n = 18$, кривая 2 – оболочке с $n = 120$ (изготовление резервуара методом рулонирования).

Как видно из приведенных результатов, отношение σ_c/σ_0 уменьшается с удаленностью вмятины от основания резервуара.

Дефекты сварных швов в виде подрезов, непроваров, трещин, несплавлений и неметаллических включений в той или иной мере имеются практически в каждой сварной конструкции.

Эти дефекты в большинстве своем могут быть отнесены к разряду трещиновидных. Отметим, что в действующих нормах проектирования практически отсутствуют рекомендации по расчетной оценке прочности конст-

рукций с такими дефектами в процессе проведения диагностики их технического состояния и остаточного ресурса.

Приближенные относительные оценки прочности и долговечности могут быть построены на основе известных зависимостей механики разрушения [6]. При этом в качестве исходной информации может быть использована статистика по возможным параметрам трещиновидных дефектов.

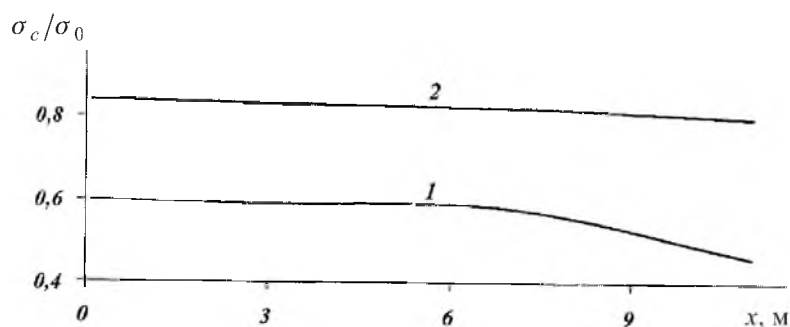


Рис. 1. Зависимость величины σ_c/σ_0 от места расположения начальных вмятин по высоте резервуара.

Дефекты, связанные с изменением толщины в результате технологических операций прокатки при изготовлении листовых заготовок, которые являются типичными, могут уменьшить значение номинальной толщины, определенной расчетом на прочность или на устойчивость, примерно на 5–10%. Для рассматриваемых конструкций это существенно.

Повреждения в виде неравномерных осадок, появляющихся в процессе монтажа конструкции, являются распространенными для данных резервуаров. Наличие неравномерных осадок даже в пределах технических допусков может приводить к появлению дополнительных меридиональных напряжений в нижней части цилиндрической стенки величиной до 0,15 предела текучести и более.

На рис. 2 приведены гистограммы относительных значений осадок (отношение зафиксированных осадок к допускаемым), полученных при анализе замеров 76 реальных резервуаров объемом 700–1000 м³ в различные периоды эксплуатации. По оси абсцисс отложено относительное значение осадок. Цифрами обозначено количество резервуаров, для которых обнаружено такое отношение. Статистический анализ имеющихся данных не дает устойчивой зависимости осадок от времени. Это можно объяснить влиянием случайных факторов: неправильное положение резервуара относительно горизонтальной плоскости, что является следствием нарушений технологии монтажа, отсутствием фиксации в технической документации восстановительных работ (данный вид повреждений относится к разряду восстанавливаемых – без проведения капитального ремонта). Однако рассмотрение гистограмм позволяет отметить, что на любом этапе эксплуатации значительная часть резервуаров имеют осадки, выходящие за пределы технических допусков. С учетом этого в расчетные оценки напряжений необходимо во всех случаях вводить некоторый коэффициент k , учитывающий возможное увеличение напряжений, вызванное неравномерными осадками.

Результаты расчетов на основе применения программных расчетных комплексов показывают, что в случаях, когда параметр неравномерности осадок превышает нормативно допустимый не более чем в 1,5–2,5 раза, коэффициент k можно принимать равным 1,1 и учитывать его при проверках прочности узла сопряжения цилиндрической стенки с днищем и нижнего пояса стенки.

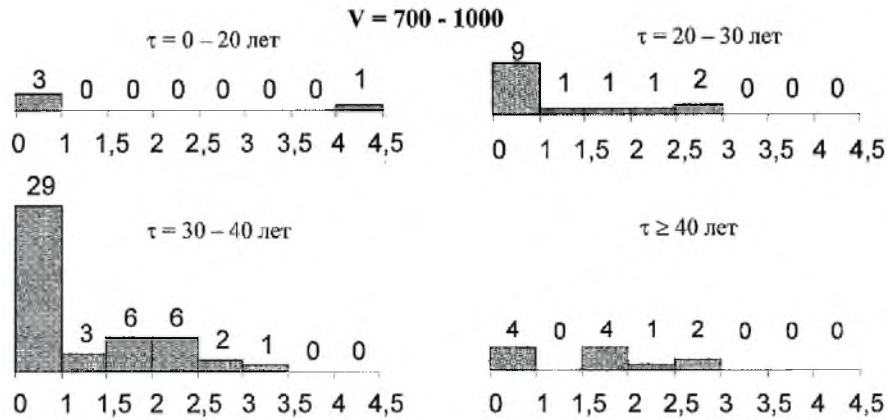


Рис. 2. Гистограммы относительных значений осадок, зафиксированных в различные периоды эксплуатации резервуаров.

Дефекты, связанные с изменением толщины, могут дать особые эффекты при оценке деформируемости стенок резервуаров и ее влияния на уточненное измерение объемов нефтепродуктов [7].

Рис. 3 и 4 иллюстрируют некоторые результаты соответствующих исследований для трех стальных цилиндрических резервуаров, состоящих из 12 сваренных в стык обечаек различной толщины. Резервуары № 1–3 имеют соответственно объемы (м^3), радиусы и высоты (м): (10^4 ; 14,25; 17,88), ($2 \cdot 10^4$; 19,95; 17,88), ($3 \cdot 10^4$; 22,8; 17,88). Минимальная и максимальная толщины обечаек 7 и 17 мм, высота обечаек 1,49 м.

Рис. 3 дает величины радиальных прогибов стенок резервуара № 2 по высоте при различных уровнях наполнения 8,19 и 16,96 м (кривые 1 и 2 соответственно). Укажем, что в сечении по высоте 6 и 12 м в резервуаре имелись подкрепляющие шпангоуты. Расчеты проводились на основе методик расчета оболочек при гидростатическом давлении при учете совместного деформирования краев обечаек. Отметим, что вес крышки и обечаек, избыточное давление, температура стенок в области газового пространства оказывают малое влияние по сравнению с деформированием, связанным с осадкой днищ, температурой в области заполнения нефтепродуктами, утонением стенок вследствие коррозии. Сплошные линии характеризуют деформирование без учета коррозии. Штриховые линии построены для стенок резервуаров, утоненных вследствие коррозии.

На рис. 4 показаны кривые, определяющие зависимость относительных погрешностей при замерах объемов хранящихся в резервуарах нефтепродуктов, возникающих вследствие деформирования стенок резервуаров. Кри-

вые 1–3 построены с учетом деформирования (осадки) днищ для резервуаров № 1–3 соответственно, кривые 4, 5 – для резервуаров № 1 и 2 при учете утонения вследствие коррозии. Расчеты проводились по формуле $\varepsilon = \left(\frac{V - V_0}{V_0} \right) \cdot 100\%$, где V, V_0 – объемы, определенные с учетом и без учета деформирования стенок резервуаров.

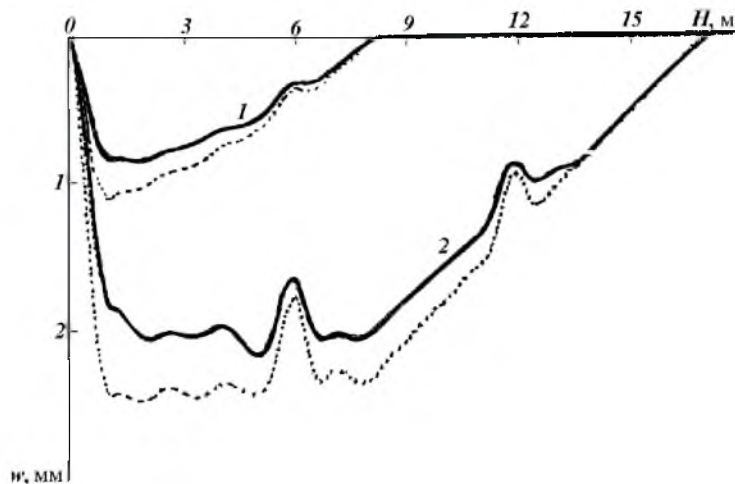


Рис. 3. Прогибы стенок цилиндрического резервуара без учета и с учетом коррозии при разных уровнях налива нефтепродукта.

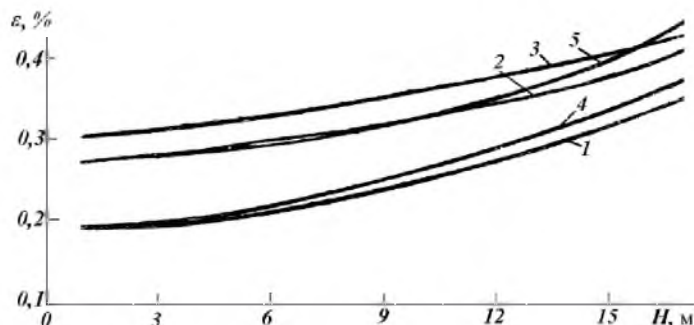


Рис. 4. Относительные погрешности ε определения объемов нефтепродукта с учетом деформирования стенок резервуаров.

Резюме

Розглянуто сталні вертикальні циліндричні резервуари для збереження нафти та нафтопродуктів. Досліджено вплив відхилень геометричної форми та різнотовщинності стінок, тріщиноподібних дефектів у зварних швах на міцнісну роботоздатність.

1. Гудрамович В. С., Деменков А. Ф. Упругопластические конструкции с несовершенствами формы и остаточными напряжениями. – Киев: Наук. думка, 1991. – 176 с.

2. *Егоров Е. А.* Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации. – Днепропетровск: Приднепр. гос. академия строительства и архитектуры, 1996. – 99 с.
3. *Shimanovsky O. V., Gordeyev V. M., and Yuras Z. A.* Post-repair durability of cylindrical tanks – theory, analysis, and some practical engineering applications // Proc. of Int. Conf. “Design, Inspection, Maintenance, and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines” (Prague, Czech Republic, 2003). – Prague, 2003. – P. 316 – 322.
4. *Гудрамович В. С., Деменков А. Ф., Егоров Е. А., Репринцев А. В.* Оценка прочности цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов при учете влияния начальных несовершенств формы // Системні технології: Регіон. міжвуз. збірник наук. праць. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 3 (32). – С. 27 – 31.
5. *Моссаковский В. И., Гудрамович В. С., Макеев Е. М.* Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций. – Киев: Наук. думка, 1988. – 288 с.
6. *Механика разрушения и прочность материалов.* Справочное пособие в 4-х т. / Под ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988.
7. *Hudramovych V. and Demenkov A.* Analysis of influence of the cylindrical tanks deformability on measurement errors of product volumes // Proc. of Int. Conf. “Design, Inspection, Maintenance, and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines” (Prague, Czech Republic, 2003). – Prague, 2003. – P. 346 – 350.

Поступила 04. 11. 2005