

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНОГО НЕФТЯНОГО РЕЗЕРВУАРА, ОСЛАБЛЕННОГО ВОДОРОДОМ



¹Татьяна Владимировна Зиновьева, к.т.н., с.н.с.,
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)321-4770, E-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com



²Денис Андреевич Соболев, аспирант,
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: Denis.Sobolev@spb.ruslab.org

Аннотация

Для хранения нефти и нефтепродуктов широко используются стальные вертикальные резервуары. Применяемые в настоящее время инженерами методы расчета прочности таких конструкций не учитывают многие факторы, например, неравномерность осадки грунта, взаимное влияние деформаций стенки и днища. Актуальность темы определена возможными экологическими и экономическими проблемами, в случае аварии. Предложена математическая модель расчета прочности резервуара на основе теории стержней.

Определено напряженно-деформированное состояние стального резервуара под воздействием статического давления нефти. Построены зависимости максимальных механических напряжений в резервуаре от уровня жидкости в нем и от жесткости основания под ним.

Проведен расчет резервуара, ослабленного воздействием водорода: определены зоны водородной дегградации материала и рассчитаны возникающие напряжения.

Ключевые слова: прочность нефтяного резервуара, расчет НДС, уторный узел, воздействие водорода.

Введение

Резервуаростроение занимает значительное место в строительной сфере нашей страны. Развитие существующих и освоение новых месторождений, наращивание добычи нефти и газа требуют увеличения объема резервуарных парков. Резервуары нефтегазовой отрасли относятся к взрыво- и пожароопасным сооружениям, отказ в работе которых может привести к очень тяжелым последствиям [1]. Поэтому обеспечению их конструктивной надежности необходимо уделять серьезное внимание.

В связи с этим важнейшей задачей является выполнение прочностных расчетов, отражающих действительные условия работы нефтегазовых резервуаров [2]. Основной этап таких расчетов – определение напряженно-деформированного состояния (НДС), обусловленного эксплуатационными нагрузками и воздействиями.

Помимо нагрузок от веса, давления нефти, ветровых и сейсмических нагрузок некоторые резервуары сталкиваются с негативным воздействием водорода [3]. Так сырьевые и технологические резервуары с добываемой из скважин продукцией подвергаются коррозионному растрескиванию и расслоению металла. Эти процессы вызывает водород, образующийся в результате электрохимических процессов на поверхности стали при участии сероводорода, углекислого газа и влаги [4 – 6].

Для расчета прочности резервуаров в настоящее время широко применяется численное моделирование в программах конечно-элементного анализа. Использование коммерческого софта и необходимых вычислительных ресурсов очень затратно, поэтому по-прежнему актуальной остается задача математического моделирования. Кроме того, при постановке сложных задач с использованием численных методов предварительные аналитические решения могут оказать большую помощь, а иногда являются решающими для успешной реализации численного алгоритма. Однако существующие методики по оценке прочности пренебрегают многими важными эффектами, что может привести к авариям.

Таким образом, разработка аналитических подходов для оценки прочности стальных нефтяных резервуаров весьма актуальна для практических применений. Цель данной работы – создание математической модели стального вертикального резервуара на основе теории упругих стержней для уточнения и совершенствования общепринятых нормативных оценок его прочности.

1. Напряженно-деформированное состояние резервуара на упругом основании

Нефтяной вертикальный резервуар представляет собой стальную наземно расположенную емкость с корпусом цилиндрической формы, вмещающую от 100 до 120000 кубических метров жидких сред (рис. 1 а).

В настоящее время разработаны и экспериментально подтверждены многие приближенные методы расчета таких резервуаров. С достаточной для практических целей точностью решены задачи о расчете стенки резервуаров с постоянной и кусочно-постоянной толщиной на прочность, расчет на устойчивость по усредненной толщине, расчет всех типов покрытий резервуаров по безмоментной теории оболочек [7 – 10].

Весьма важной с практической точки зрения остается задача определения напряженного состояния, возникающего в сопряжении стенки резервуара с днищем (уторный узел). Установлено, что 30% всех ремонтных работ в резервуарном парке составляет ремонт в зоне уторного узла [11], в связи с этим многими авторами проводятся исследования по оптимизации его формы. Так для повышения эксплуатационной надежности РВС в работе [12] предлагается заменить стандартный уторный узел со сварным тавровым соединением на часть тороидального кольца, а авторы [13] указывают на необходимость использования вогнутого сварного шва. Для проведения подобных исследований необходимо иметь точные решения, дающие оценку местных напряжений в резервуаре и устанавливающие влияние краевых эффектов.

Метод расчета уторного узла, предложенный еще Тимошенко [14, 15], был развит Сафаряном [16]. Основным допущением данного метода является разделение системы на части – стенку и днище, при этом деформации составных частей рассматриваются без привязки друг к другу. При таком подходе расчеты существенно упрощаются, однако отсутствует возможность вычисления деформаций и напряжений внутри самого узла.

В этой работе построена математическая модель резервуара, в которой стенка и днище рассматриваются как единая система. Ограничимся пока рассмотрением осесимметричной нагрузки на резервуар, чтобы иметь возможность заменить цилиндрическую стенку радиуса R и толщиной h_1 совокупностью упругих полосок и применить теорию стержней. Взаимное влияние полосок-стержней можно учитывать с помощью упругого основания с коэффициентом постели $K_1 = E_1 h_1 / R^2$, где E_1 – модуль упругости материала стенки резервуара [17].

Будем предполагать также, что днище может изгибаться, но не деформируется в своей плоскости. Как показано в работе [18], это имеет место при постановке резервуара на твердый грунт с модулем упругости больше 10 МПа. Смоделируем стенку и днище резервуара с помощью

стержневой модели Кирхгоффа, не учитывающей растяжение. Схема модели представлена на рис. 1 б), там показаны положительные направления смещений и нагрузки. Воспользовавшись осевой симметрией, будем моделировать лишь часть резервуара, а в центре днища поставим условия симметрии.

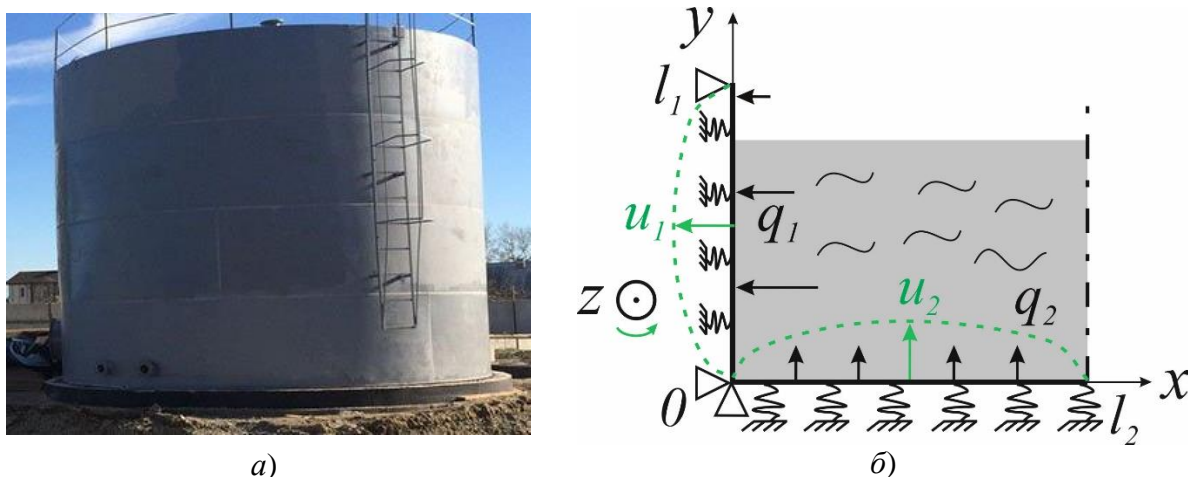


Рис. 1. Резервуар вертикальный а) и схема его расчета б)

Для стационарных покрытий резервуаров можно с достаточной точностью считать, что они являются абсолютно жесткими, поэтому граничным условием на линии соприкосновения стенки и крыши будет отсутствие радиальных смещений и поворотов.

Граничные условия в месте сопряжения стенки с днищем ставятся в предположении, что уторный узел стоит на жестком фундаментном кольце, сам узел не проседает, но днище, лежащее на упругом основании с коэффициентом постели K_2 , может провисать.

В классической модели поворот сечений балки $\theta(s)$ связан с прогибом $u(s)$. Уравнения баланса сил и соотношения упругости для балки имеют вид [19]:

$$Q' = -q, \quad M' = -Q, \quad M = a\theta', \quad u' = \theta, \quad (1)$$

где Q, M – поперечная сила и изгибающий момент, a – жесткость балки на изгиб, $(...)'$ – дифференцирование по осевой координате s , q – внешняя сила на единицу длины балки.

Заменяя далее цилиндрическую стенку и круглую пластину днища на балки единичной глубины, мы будем использовать их цилиндрические жесткости на изгиб. Система (1) приводит к уравнениям четвертого порядка для прогиба стенки и днища на упругих основаниях:

$$D_i u_i^{IV} + K_i u_i = f_i(s), \quad D_i = E_i \frac{h_i^3}{12(1-\nu_i^2)}, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Здесь в соответствии с рис. 2 индексом “1” обозначены все параметры стенки, индексом “2” – днища: D_i – цилиндрическая жесткость, K_i – коэффициент постели, E_i – модуль упругости, h_i – толщина, ν_i – коэффициент Пуассона. Для балки, моделирующей стенку, осевой координатой будет y , а моделирующей днище – x . Силы, действующие со стороны силы тяжести и жидкости f_i , найдем по формулам:

$$f_1(y) = \begin{cases} p_0 + \gamma(H - y), & 0 \leq y \leq H \\ p_0, & H < y \leq l_1 \end{cases}, \quad f_2(x) = -(p_0 + \gamma H) - w,$$

где p_0 – избыточное давление на поверхности жидкости, H – уровень налива жидкости в резервуаре, γ – погонный вес жидкости, w – погонный вес днища.

Решая уравнения (2), получим выражение для прогибов стенки и днища с 8-ю неизвестными константами A_{11} – A_{42} :

$$u_i = e^{\beta_i s} (A_{1i} \cos \beta_i s + A_{2i} \sin \beta_i s) + e^{-\beta_i s} (A_{3i} \cos \beta_i s + A_{4i} \sin \beta_i s) + \frac{1}{K_i} f_i(s), \quad (3)$$

где $\beta_i = \sqrt[4]{\frac{K_i}{4D_i}}$, $i = 1, 2$.

Заметим, что решение (3) справедливо только для постоянных значений D_i и K_i . Для определения всех констант имеем 8 граничных условий.

- При $y = l_1$ отсутствует смещение и поворот: $u_1 = 0, u_1' = 0$.
- При $x = R$ отсутствует поворот и перерезывающая сила: $u_2' = 0, u_2''' = 0$.
- При $x = 0$ отсутствуют смещения: $u_1 = 0, u_2 = 0$, а также непрерывны поворот и изгибающий момент: $u_1' = u_2', D_1 u_1'' = D_2 u_2''$.

После определения изгибающего момента в балках по формулам (1), необходимо оценить возникающие напряжения. Для этого воспользуемся известной инженерной формулой для расчета максимального осевого напряжения по сечению [20]:

$$|\sigma^{\max}| = \frac{|M|}{I} \frac{h}{2}, \quad I = \frac{1 \cdot h^3}{12}, \quad (4)$$

где I – осевой момент инерции сечения. Как показано в работе [21], асимптотический анализ трехмерной задачи теории упругости подтверждает справедливость гипотезы о линейном распределении осевых напряжений в сечении балки при изгибе.

В настоящее время в машиностроении применяют два подхода к определению механической прочности конструкций: по величине допускаемого напряжения и по предельному состоянию [10, 22].

В первом случае при оценке прочности резервуара сравнивают рассчитанные напряжения (4) с пределом прочности стали, в

рассматриваемом случае с $[\sigma_1] = 490$ МПа. Тогда из (4) следует критическое значение изгибающего момента: $M_{\max} = [\sigma_1] h^2 / 6$.

Оценивая прочность резервуара по предельному состоянию, потерей им несущей способности можно считать достижение изгибающим моментом значения полного пластического момента: $M_{pl} = [\sigma]_T h^2 / 4$, где предел текучести стали $[\sigma]_T = 345$ МПа [23].

Значения критических моментов отличаются на 5%, поскольку оценка момента по первому подходу более жесткая, будем использовать этот критерий в данной работе.

Расчеты проводились для резервуара РВС-20000 м³, который обычно устанавливается на нефтедобывающих предприятиях и перевалочных пунктах для хранения светлых и темных нефтепродуктов. Радиус резервуара $R = 20$ м, высота $l_1 = 18$ м, толщины стенки и днища в этом расчете постоянные: $h_1 = 13$ мм, $h_2 = 6$ мм. Свойства стали: модуль упругости $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.28$. Объемная плотность нефти $\rho_n = 0.9$ т/м³, избыточное давление на поверхности $p_0 = 2$ кПа. Масса днища 65 т. Жесткость грунтового основания K_2 принята равной 5 МН/м³ (песок).

Как и ожидалось, максимально напряженным участком резервуара является уторный узел. Определены механические напряжения в резервуаре, критерий прочности не выполняется в сечении днища в уторном узле уже при уровне налива нефти более 6.5 м. Очевидно, что для упрочнения резервуара необходимо увеличить толщины стенки и днища в месте их соединения друг с другом.

2. Учет переменной толщины стенки на НДС резервуара

Как правило, стенка резервуара состоит из нескольких поясов разной толщины с ее увеличением к основанию, днище также утолщается ближе к уторному узлу. Сварка стенки с днищем обеспечивается за счет двустороннего таврового соединения (рис. 2 а). Предельный размер катета углового шва h_k таврового соединения равен 14 мм, наружный шов выполняют с выпуклостью α_n , внутренний шов – с вогнутостью $\alpha_{вн}$.

Нахлестку в монтажном стыке и сварной шов можно учесть в расчетах как локальное утолщение стенки резервуара. При учете этих конструктивных особенностей толщины h_1 и h_2 становятся функциями осевой координаты, как и коэффициенты в уравнениях (1). В общем случае решение задачи можно получить только численно.

Для стенки и днища резервуара запишем систему уравнений (1) в виде:

$$Y' = C(s)Y + F(s), \quad Y = (Q_i, M_i, \theta_i, u_i)^T, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Она дополняется граничными условиями из п. 1. Задача решается численно методом конечных разностей [24, 25].

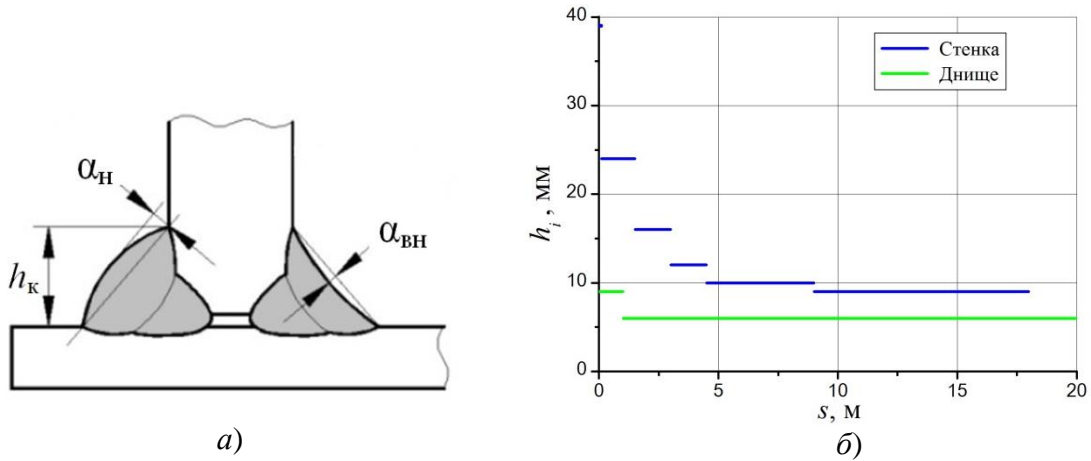


Рис. 2. Уторный узел *a)* и толщины стенки и днища как функции осевой координаты *б)*

Теперь в расчетах резервуара из п. 1 использованы переменные толщины стенки и днища, графики их зависимости от осевой координаты показаны на рис. 2 б. Рассчитанные перемещения и повороты сечений в стенке и днище резервуара для уровня жидкости $H = 10$ м показаны на рис. 3.

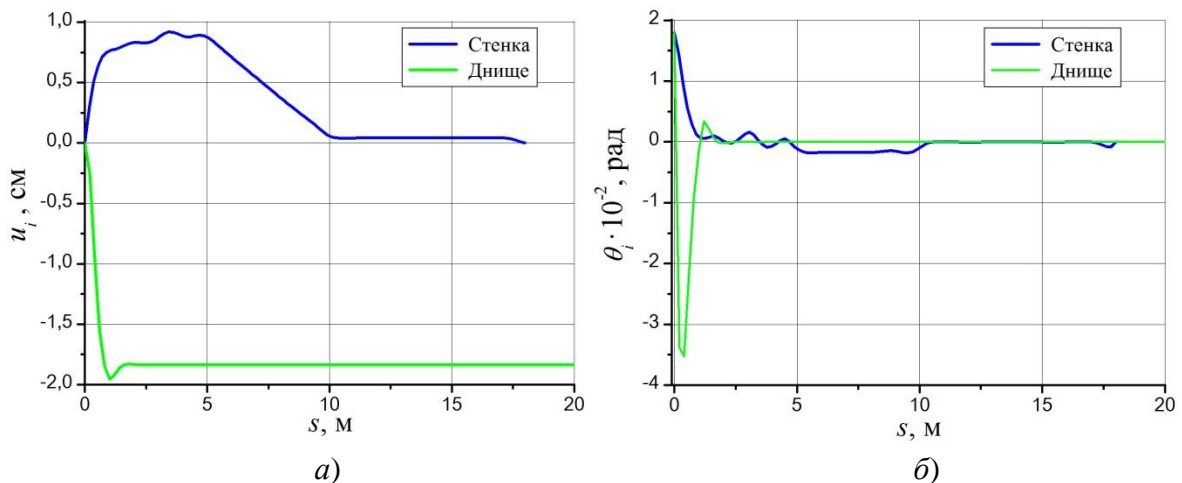


Рис. 3. Перемещения *a)* и повороты *б)* сечений как функция осевой координаты

Осадка днища при заданной нагрузке равна 1.84 см. Максимальное смещение стенки 0.92 см достигается на высоте 3.4 м, где толщина стенки равна 1.2 см. Максимальные усилия достигаются в области уторного узла, графики перерезывающей силы и изгибающего момента показаны на рис. 4.

Определенные механические напряжения в резервуаре показаны на рис. 5, Максимальное напряжение в стенке равно 75 МПа, в днище – 470 МПа, критерий прочности по величине допускаемого напряжения выполняется и в стенке, и в днище.

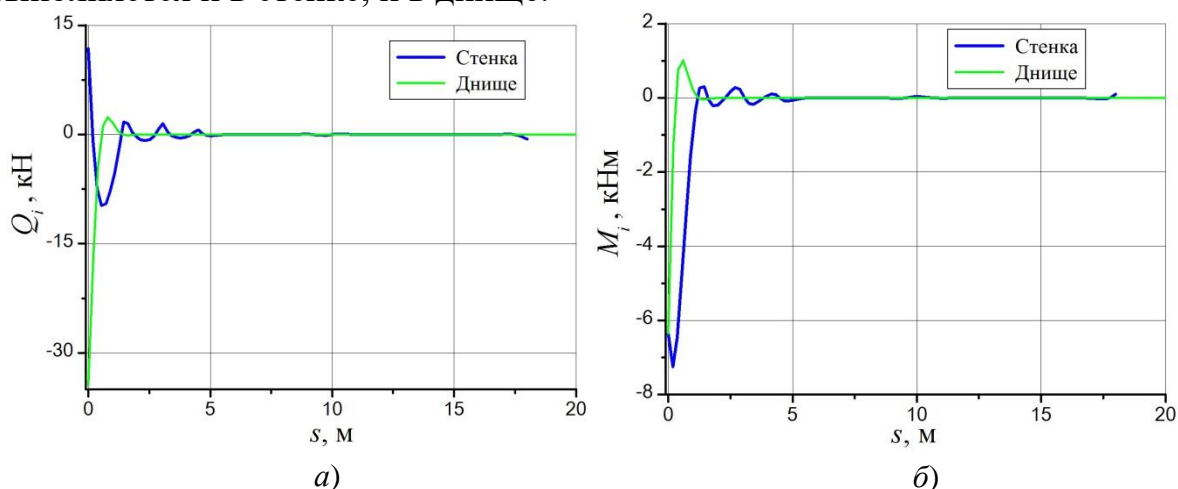


Рис. 4. Перерезывающая сила *a)* и момент *б)* в сечениях как функция осевой координаты

Слабым местом конструкции является сечение днища в уторном узле, практический интерес представляет зависимость максимального напряжения в этом сечении от уровня налива жидкости и жесткости грунтового основания.

На рис. 6 показана эта зависимость, уровень налива нефти в резервуар *H* менялся в расчетах от 1 до 17 м. Предел прочности стали на графике показан пунктирной линией.

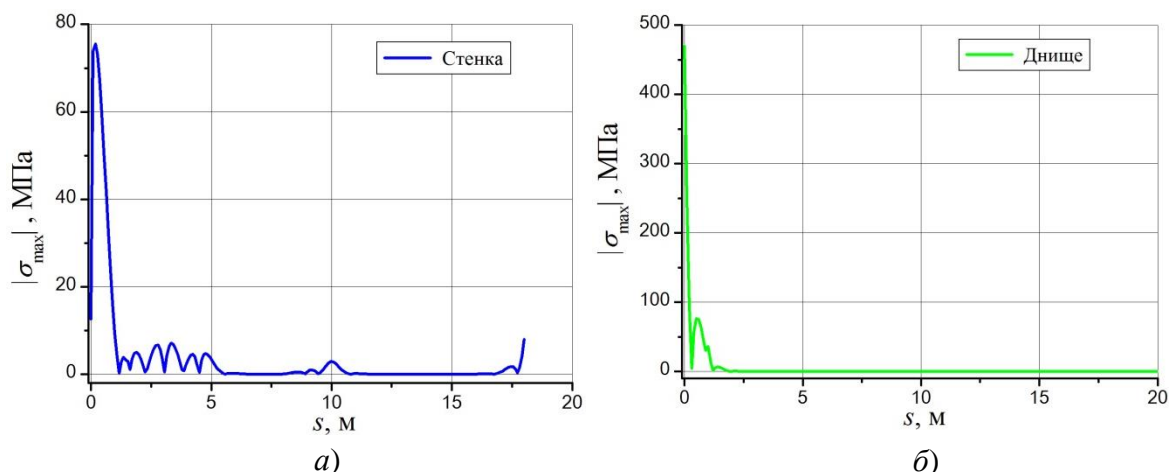


Рис. 5. Максимальные напряжения в сечении стенки *a)* и днища *б)*

Значение максимальных напряжений в резервуаре сильно зависит от жесткости грунтового основания под ним: для K_2 равного 5 МН/м^3 предел

прочности достигается при уровне налива жидкости 10.5 м, а для жесткости 50 МН/м^3 – при 17 м.

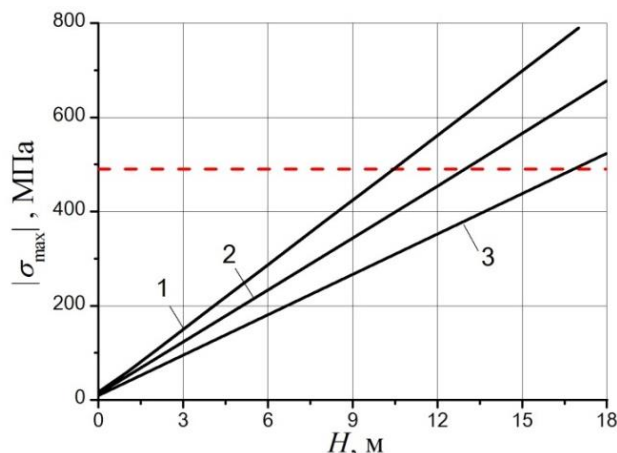


Рис. 6. Зависимость максимального напряжения от уровня жидкости при жесткости основания K_2 : 5 МН/м^3 (1), 10 МН/м^3 (2), 50 МН/м^3 (3)

3. Воздействие водорода на прочность резервуара

Стальные резервуары корродируют во время их эксплуатации, менее всего подвержена коррозии средняя часть резервуара, постоянно или длительно смачиваемая нефтью, а днище и нижний пояс резервуара подвергаются довольно сильной коррозии. При наличии в нефти сероводорода сквозные отверстия в днище появляются через 3 – 5 лет [26]. В работе [27] анализируется статистика технической диагностики резервуаров, находившихся в эксплуатации более 20 лет, там указано, что наибольшее количество коррозионных дефектов по высоте 1-го пояса стенки резервуаров концентрируется вблизи уторного шва, а на расстоянии 20 см от него они почти не встречаются.

Для конструкций, контактирующих с коррозионно-активной сероводородсодержащей средой, на практике допускаемые напряжения определяют с учетом коэффициентов запаса прочности в соответствии с [28]. Общий принцип подхода к расчету, использованный в этом стандарте, состоит в ограничении растягивающих напряжений в элементах, контактирующих с водородом.

Действительно, многочисленные опыты показывают, что только растягивающие напряжения играют роль в процессе водородной деградации металлов. При моделировании влияния водорода на сталь резервуара будем учитывать исследования, проведенные в работах [29, 30] для цилиндрических конструкций под давлением водородосодержащих сред. Для заданной концентрации водорода принимается существование порогового значения растягивающего напряжения σ_* , до превышения которого водород не вызывает коррозии металла. При превышении этого

напряжения происходит ослабление металла посредством накопления поврежденности, это приводит к уменьшению его эффективного модуля упругости [31, 32].

При изгибе стенки и днища резервуара в них всегда есть растянутый слой, его положение зависит от знака изгибающего момента. Атомы свободного водорода устремляются из сжатого слоя в область больших растягивающих напряжений (рис. 7) и при превышении критического напряжения запускают процесс деградации материала. В результате образуется слой с ослабленными механическими характеристиками, причем либо внутри резервуара, либо снаружи.

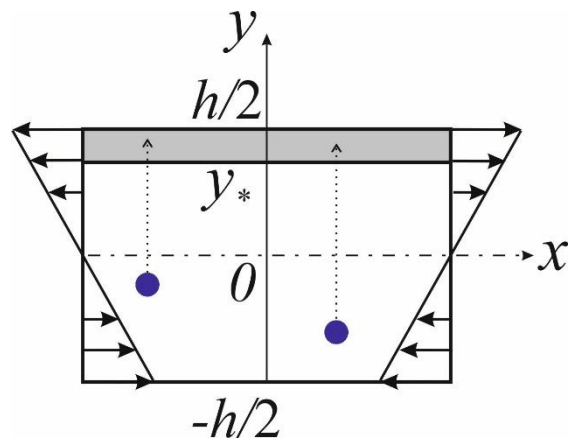


Рис. 7. Ослабленный водородом слой металла

Учитывая линейное распределение напряжений по сечению, толщина поврежденного слоя, где $\sigma > \sigma_*$, может быть найдена так:

$$h_* = \frac{h}{2} \left(1 - \frac{\sigma_*}{|\sigma^{\max}|} \right). \quad (6)$$

Положим модуль упругости ослабленной водородом стенки и днища резервуара кусочно-постоянным:

$$E_i(y) = \begin{cases} E_i, & -h_i/2 < y < y_* \\ nE_i, & y_* < y < h_i/2 \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (7)$$

где $0 < n < 1$ – характеризует степень поврежденности металла.

Водородную деградацию стали резервуара теперь можно учесть, задав цилиндрические жесткости D_1 и D_2 как функции осевой координаты, вычисленные по формуле:

$$D_i = \frac{1}{1-\nu^2} \int_{-h_i/2}^{h_i/2} E_i(y) y^2 dy, \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

Коэффициент постели упругого основания стенки резервуара найдем через усредненный модуль Юнга:

$$K_1 = E_1^* h_1 / R^2, \quad E_1^* = \frac{1}{h_1} \int_{-h_1/2}^{h_1/2} E_1(y) dy. \quad (9)$$

Критическое значение растягивающего напряжения σ_* зависит от металла и концентрации свободного водорода в нем [33], ограничимся в расчете резервуара из п. 2 постоянным значением $\sigma_* = 50$ МПа, параметр n примем равным 0.8. Проведен расчет для случая жесткости грунта K_2 равного 5 МН/м^3 и уровня налива нефти $H = 10$ м.

На рисунке 8 представлена характеристика глубины повреждения:

$$\delta = \frac{h_*}{h_i} \cdot 100\% \begin{cases} \text{sign}(M_i), i = 1 \\ \text{sign}(-M_i), i = 2. \end{cases}$$

Она показывает, какой процент от толщины металлического листа подвергся водородной деградации. Положительное ее значение соответствует образованию ослабленного слоя внутри резервуара, а отрицательное – снаружи.

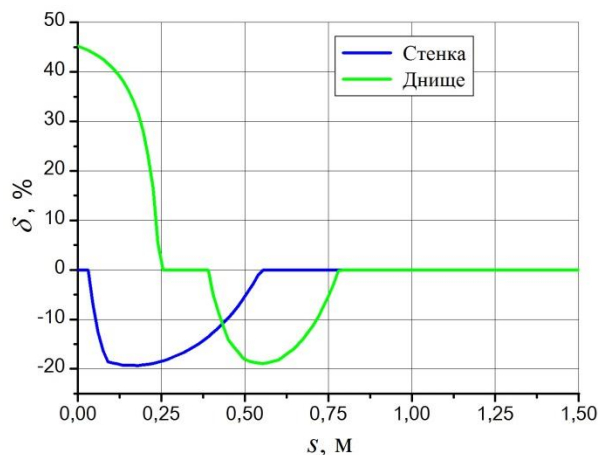


Рис. 8. Характеристика глубины повреждения резервуара

Как показали расчеты, ослабленный слой образуется в стенке резервуара снаружи, с максимальной глубиной повреждения на расстоянии 18 см от уторного узла. В днище возможна сильная деградация материала внутри резервуара рядом с уторным узлом и снаружи, на расстоянии 55 см от него.

Напряжения в резервуаре без воздействия водорода были показаны на рисунке 5. Укрупненная картина распределения напряжений вблизи уторного узла показана на рисунке 9 сплошными линиями, там же пунктирными линиями показаны напряжения в ослабленном резервуаре. Появление ослабленного слоя, обусловленного воздействием водорода, увеличило максимальные напряжения: в стенке с 75 МПа до 81 МПа, в

днище с 470 МПа до 526 МПа. Критерий прочности по величине допускаемого напряжения в днище теперь не выполняется.

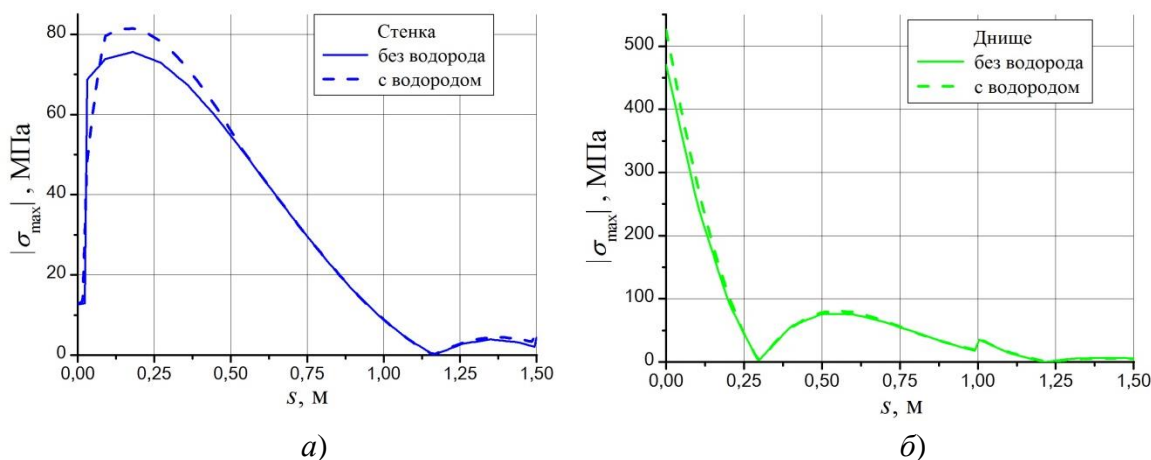


Рис. 9. Максимальные напряжения вблизи уторного узла в стенке *а)* и днище *б)* с ослабленным водородом слоем

Закключение

Рассмотрена стержневая модель цилиндрического нефтяного резервуара, в которой стенка и днище работают совместно, что позволило получить напряжения в наиболее нагруженной части – уторном узле.

Проведенные в работе расчёты показали, что водород, содержащийся в нефти, способен значительно влиять на напряжения в резервуаре.

В дальнейшем для уточнения расчётов планируется использовать стержневую модель Кирхгоффа-Клебша, учитывающую растяжение стенки резервуара, чтобы снять условие отсутствия прогиба днища в уторном узле. Это позволит описать эффект отрыва днища от фундамента при малых уровнях налива жидкости.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПМаш РАН FFNF-2024-0003 № 124041100005-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Розенштейн И.М. Аварии и надёжность стальных резервуаров. М.: Недра. 1995. 253 с.
- [2] Васильев Г.Г., Коробков Г.Е., Коршак А.А. и др. Трубопроводный транспорт нефти. М.: Недра-Бизнесцентр. 2002. Т. 1. 407 с.
- [3] Шрейдер А.В., Шпарбер И.С., Арчаков Ю.И. Влияние водорода на нефтяное и химическое оборудование. М.: Машиностроение. 1976. 144 с.

- [4] Плугарь В.И. Коррозия металлических конструкций и защитные покрытия в сероводородсодержащих средах. М.: Химия. 2004. 128 с.
- [5] Djukic, M. B., Zeravcic, V. S., Bakic G. M. et al. Hydrogen damage of steels: a case study and hydrogen embrittlement model. 2015. Engineering Failure Analysis, 58, pp. 485-498. DOI:10.1016/j.engfailanal. 2015.05.017.
- [6] Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. М.: Металлургия. 1985. 192 с.
- [7] Сафарян М.К., Иванцов О.М. Проектирование и сооружение стальных резервуаров. М.: Гостоптехизат. 1961. 329 с.
- [8] Нехаев Г.А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления. М.: АСВ. 2005. 210 с.
- [9] ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. (с Поправками, с Изменением № 1). Введ. 01.08.2023. М.: Стандартинформ. 2023. 122 с.
- [10] СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М.: РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА. 2009. 205 с.
- [11] Горелов А.С. Неоднородные грунтовые основания и их влияния на работу вертикальных стальных резервуаров. СПб.: Недра. 2009. 220 с.
- [12] Терземан Ю.В., Землеруб Л.Е. Повышение надёжности стальных резервуаров: замена сварного таврового соединения стенки и днища тороидальным переходом. 2019. Деловой журнал Neftegaz.RU, 2(86), с. 102–103.
- [13] Васильев Г.Г., Катанов А.А., Семин Е.Е. Оценка долговечности уторных узлов вертикальных цилиндрических резервуаров в процессе эксплуатации. 2012. Журнал нефтегазового строительства, 4, с. 36–41.
- [14] Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Более сложные вопросы теории и задачи. М.: Наука. 1965. Т. 1. 480 с.
- [15] Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука. 1966. 636 с.
- [16] Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры. М.: Недра. 1987. 144 с.
- [17] Березин В.Л., Шутов В.Е. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов. М.: Недра. 1973. 200 с.
- [18] Потапов А. Ю. Влияние деформационных характеристик грунтов основания на работу стенки и днища резервуара: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19. Тюмень. 2006. 106 с.
- [19] Елисеев В.В., Зиновьева Т.В. Механика тонкостенных конструкций. Теория стержней: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2008. 96 с.
- [20] Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана (TerMech). 2021. 542 с.

- [21] Елисеев В.В. Механика упругих тел. СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2003. 336 с.
- [22] ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. Введ. 01.08.2018. М.: Стандартинформ, 2018. 29 с.
- [23] СП 16.13330.2017. "СНиП II-23-81* Стальные конструкции" (с Изменениями № 1–5). Введ. 08.28.2017. М.: Стандартинформ. 2017. 195 с.
- [24] Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. М.: Лаборатория знаний. 2020. 636 с.
- [25] Волков Е. А. Численные методы. СПб.: Лань. 2022. 252 с.
- [26] Медведева М.Л., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. 2013. 250 с.
- [27] Тарасенко М.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко А.А. Анализ результатов дефектоскопии коррозионных повреждений резервуаров. 2010. Нефть и газ, 5, с. 78 - 82.
- [28] ГОСТ 34233.10 - 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты, работающие с сероводородными средами. Введ. 01.08.2018. М.: Стандартинформ. 2018. 6 с.
- [29] Зиновьева Т.В. Влияние концентрации водорода на растрескивание трубы. Современное машиностроение: Наука и образование. 2020. С. 196–206. DOI: 10.1872/MMF-2020-15
- [30] Зиновьева Т.В. Моделирование условий возникновения трещин в трубе под давлением водородосодержащей среды. 2023. Вестник ПНИПУ. Механика, 3, с. 86-96. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.3.08
- [31] Филиппенко Г.В., Зиновьева Т.В. О влиянии водородной коррозии на колебания трубы как многослойной цилиндрической оболочки. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 334-347.
- [32] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Harmonic Vibrations of a Hydrogen-Damaged Pipeline as an Inhomogeneous Shell. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. pp. 187-194. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_21.
- [33] Zinovieva, T.V., Galyautdinova, A.R. Hydrogen Degradation of Material of a Bearing Ring Fitted on a Rotating Shaft. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2024. pp. 66-76. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_7.

STRENGTH ANALYSIS OF A STEEL OIL TANK WEAKENED BY HYDROGEN

Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS, St.-Petersburg, Russia

Abstract

Steel vertical tanks are widely used for storing oil and petroleum products. The methods currently used by engineers to calculate the strength of such structures do not take into account many factors, for example, uneven soil settlement, the mutual influence of deformations of the wall and bottom. The relevance of the topic is determined by possible environmental and economic problems in the event of an accident. A mathematical model for calculating the strength of a tank based on the theory of rods is proposed.

The stress-strain state of a steel tank under the influence of static oil pressure is determined. Dependences of maximum mechanical stresses in the tank on the level of liquid in it and on the stiffness of the base under it are constructed.

The calculation of the tank weakened by hydrogen influence is carried out: the zones of hydrogen degradation of the material are determined and the arising stresses are calculated.

Key words: strength of oil tank, calculation of stress-strain state, T-joint of the wall and bottom, exposure to hydrogen.

REFERENCES

- [1] Rosenshtein, I.M. Accidents and reliability of steel tanks. M.: Nedra. 1995. 253 p. (rus.)
- [2] Vasiliev, G.G., Korobkov, G.E., Korshak, A.A. etc. Oil pipeline transport. M.: Nedra-Business Center. 2002. V. 1. 407 p. (rus.)
- [3] Shrader, A.V., Shparber, I.S., Archakov, Yu.I. The influence of hydrogen on oil and chemical equipment. M.: Mashinostroenie. 1976. 144 p. (rus.)
- [4] Plugar, V.I. Corrosion of metal structures and protective coatings in hydrogen sulfide-containing environments. M.: Himiya. 2004. 128 p. (rus.)
- [5] Djukic, M. B., Zeravcic, V. S., Bakic G. M. et al. Hydrogen damage of steels: a case study and hydrogen embrittlement model. 2015. Engineering Failure Analysis, 58, pp. 485-498. DOI:10.1016/j.engfailanal. 2015.05.017.
- [6] Archakov, Yu.I. Hydrogen corrosion of steel. M.: Metallurgiya. 1985. 192 p. (rus.)

- [7] Safaryan, M.K., Ivantsov, O.M. Design and construction of steel tanks. M.: Gostoptekhzizat. 1961. 329 p. (rus.)
- [8] Nekhaev, G.A. Design and calculation of steel cylindrical tanks and low pressure gas holders. M.: ASV. 2005. 210 p. (rus.)
- [9] GOST 31385-2023. Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil-products. General specifications. (as Amended, with Change No. 1). Introduced. 08/01/2023. M.: Standartinform. 2023. 122 p. (rus.)
- [10] STO-SA-03-002-2009. Rules for the design, manufacture and installation of vertical cylindrical steel tanks for oil and oil-products. M.: ROSTEKHEXPERTIZA. 2009. 205 p. (rus.)
- [11] Gorelov, A.S. Heterogeneous soil foundations and their influence on the operation of vertical steel tanks. St. Petersburg: Nedra. 2009. 220 p. (rus.)
- [12] Terzeman, Yu.V., Zemlerub, L.E. Increasing the reliability of steel tanks: replacing the welded T-joint of the wall and bottom with a toroidal transition. 2019. Business magazine Neftegaz.RU, 2(86), pp. 102-103. (rus.)
- [13] Vasiliev, G.G., Katanov, A.A., Semin, E.E. Assessing the durability of the T-joints of the wall and bottom of vertical cylindrical tanks during operation. 2012. Journal of Oil and Gas Construction, 4, pp. 36–41. (rus.)
- [14] Timoshenko, S.P. Strength of materials. More complex theoretical issues and problems. M.: Nauka. 1965. V. 1. 480 p. (rus.)
- [15] Timoshenko, S.P., Voinovsky-Krieger, S. Plates and shells. M.: Nauka. 1966. 636 p. (rus.)
- [16] Safaryan, M.K. Metal tanks and gas holders. M.: Nedra. 1987. 144 p. (rus.)
- [17] Berezin, V.L., Shutov, V.E. Strength and stability of tanks and pipelines. M.: Nedra. 1973. 200 p. (rus.)
- [18] Potapov, A. Yu. Influence of deformation characteristics of foundation soils on the performance of the wall and bottom of the tank: dis. ...cand. tech. Sciences: 25.00.19. Tyumen. 2006. 106 p. (rus.)
- [19] Eliseev, V.V., Zinovieva, T.V. Mechanics of thin-walled structures. Theory of rods: textbook. St. Petersburg: SPbSPU Publishing House. 2008. 96 p. (rus.)
- [20] Feodosiev, V.I. Strength of materials: a textbook for universities. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman (TerMech). 2021. 542 p. (rus.)
- [21] Eliseev, V.V. Mechanics of elastic bodies. St. Petersburg: SPbSPU Publishing House. 2003. 336 p. (rus.)
- [22] GOST 34233.1-2017. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. General requirements. Intro. 08/01/2018. M.: Standartinform. 2018. 29 p. (rus.)
- [23] SP 16.13330.2017. "SNIp II-23-81* Steel structures" (with Amendments No. 1–5). Intro. 08.28.2017. M.: Standartinform. 2017. 195 p. (rus.)

- [24] Bakhvalov, N.S., Zhidkov, N.P., Kobelkov, G.G. Numerical methods. M.: Laboratoriya znaniy. 2020. 636 p. (rus.)
- [25] Volkov, E. A. Numerical methods. St. Petersburg: Lan. 2022. 252 p. (rus.)
- [26] Medvedeva, M.L., Muradov, A.V., Prygaev, A.K. Corrosion and protection of main pipelines and reservoirs. M.: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2013. 250 p. (rus.)
- [27] Tarasenko, M.A., Silnitsky, P.F., Tarasenko, A.A. Analysis of the results of flaw detection of corrosion damage to reservoirs. 2010. Oil and gas, 5, pp. 78-82. (rus.)
- [28] GOST 34233.10 - 2017. Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength calculation. Vessels and apparatus involving hydrogen sulphide media. Introduction. 01.08.2018. M.: Standartinform. 2018. 6 p. (rus.)
- [29] Zinovieva, T.V. The effect of hydrogen concentration on pipe splitting. Modern mechanical engineering: Science and education. 2020. pp.196-206. DOI: 10.1872/MMF-2020-15. (rus.)
- [30] Zinovieva, T.V. Modelling of the conditions of cracking in a pipe under the pressure of hydrogen-containing medium. 2023. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics, 3, pp. 86-96. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.3.08 (rus.)
- [31] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. On the influence of hydrogen corrosion on the vibrations of a pipe as a multilayer cylindrical shell. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 334-347. (rus.)
- [32] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Harmonic Vibrations of a Hydrogen-Damaged Pipeline as an Inhomogeneous Shell. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. pp. 187-194. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_21.
- [33] Zinovieva, T.V., Galyautdinova, A.R. Hydrogen Degradation of Material of a Bearing Ring Fitted on a Rotating Shaft. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2024. pp. 66-76. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_7.