

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 622.692.4.074.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-99-113

*В.И. ХИЖНЯКОВ, А.В. НЕГОДИН, Р.Ю. БАКШАНСКИЙ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

О ВЛИЯНИИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА С ДНИЩЕМ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ РВС-20000

Аннотация. На основе результатов аналитического исследования краевого эффекта в задаче изгиба стенки резервуара типа РВС-20000 по моментной теории в сопоставлении с результатами, полученными по безмоментной теории, показано, что условие прочности узла сочленения стенки резервуара с днищем в обоих случаях выполняется.

Напряжения, полученные по безмоментной теории с учетом повышающих коэффициентов запаса, на 11,1 % превышают величину максимальных напряжений, полученных по моментной теории с учетом краевого эффекта. Это дает возможность при расчете толщины стенки использовать уравнения безмоментной теории, исключаяющей проведение сложных расчетов моментной теории. Преимущество моментной теории состоит в том, что, в отличие от безмоментной, она дает возможность рассчитать величину напряжений и деформаций самого уторного узла.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что надежность эксплуатации узла сопряжения стенки резервуара с днищем определяется в первую очередь качеством подготовки основания для строительства резервуара, качеством сварки уторного сварного шва (в т. ч. при отрицательных температурах) и методик их дефектоскопического контроля на строительной площадке.

Ключевые слова: резервуары вертикальные стальные (РВС), узел соединения стенки резервуара с днищем, краевой эффект, кольцевые и продольные напряжения, изгибающий момент, горизонтальная срезающая сила, тавровый сварной шов

Для цитирования: Хижняков В.И., Негодин А.В., Бакшанский Р.Ю. О влиянии краевого эффекта узла сопряжения стенки резервуара с днищем на эксплуатационную надежность РВС-20000 // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 99–113.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-99-113

V.I. KHIZHNYAKOV, A.V. NEGODIN, R.Yu. BAKSHANSKIY,
Tomsk State University of Architecture and Building

EDGE EFFECT OF THE TANK WALL-BOTTOM JOINT ON SERVICE RELIABILITY OF VERTICAL STEEL TANK

Abstract. The paper presents the analysis of the edge effect in the wall bending of a vertical steel tank RVS-20000 using a comparison between the results obtained by using the bending theory and membrane theory. It is shown that the condition of the wall-bottom joint strength is satisfied in both cases.

The stresses obtained according to the bending theory with regard to multiplying safety factor, exceed the maximum stresses by 11.1 % obtained by using the membrane theory with account for the edge effect. This makes it possible to use the membrane theory equations in calculating the wall thickness, which excludes complex calculations of the bending theory. Unlike the membrane theory, the membrane theory provides the stress and strain calculation of the T-junction. The results obtained indicate that the service reliability of the wall-bottom joint is primarily determined by the preparation quality of the tank base, welding quality of the T-junction (including negative temperatures) and the methods of their flaw detection on the construction site.

Keywords: vertical steel tank, wall-bottom joint, edge effect, hoop and longitudinal stresses, bending moment, drag force, T-weld

For citation: Khizhnyakov V.I., Negodin A.V., Bakshanskii R.Yu. O vliyani kraevogo effekta uzla sopryazheniya stenki rezervuara s dnishchem na ekspluatatsionnyu nadezhnost' RVS-20000 [Edge effect of the tank wall-bottom joint on service reliability of vertical steel tank]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 3. Pp. 99–113.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-99-113

Для хранения нефти и нефтепродуктов практически повсеместно используют вертикальные стальные цилиндрические резервуары (РВС) большой емкости – более 10 000 м³. До настоящего времени вопрос обеспечения их эксплуатационной надежности остается актуальным, сохраняется тенденция роста аварийных ситуаций в резервуарных парках страны. Основной причиной инцидентов, аварий и даже катастроф (> 50 %) являются недопустимо большие неравномерные осадки основания резервуаров. В процессе длительной эксплуатации неравномерная осадка наружного контура днища приводит к появлению трещин в области наиболее нагруженного конструктивного элемента – узла сочленения стенки резервуара с днищем – и их распространению по стенке и днищу с последующей разгерметизацией резервуара. Разлив нефти и нефтепродуктов наносит колоссальный экологический и социальный вред. В экстремальных случаях, по опубликованным данным, материальный ущерб от аварийного разрушения РВС-20000 превышает затраты на сооружение нового резервуара в десятки раз, что свидетельствует о необходимости обеспечения длительной безаварийной эксплуатации узла сопряжения стенки резервуара с днищем как на стадии проектирования и строительства, так и в процессе эксплуатации резервуара. Уторный шов является важнейшим узлом резервуара, в котором при хранении нефти и нефтепродуктов концен-

трируются максимальные напряжения, что, как следствие, приводит к высокой аварийности по причине его разрушения. В связи с этим в последние годы среди специалистов высказывается мнение о необходимости увеличения жесткости узла сопряжения путем увеличения толщины стенки нижнего пояса и толщины окрайки днища.

В узле сопряжения стенки нижнего пояса с днищем главным расчетным элементом является стенка нижнего пояса. Днище, в отличие от нижнего пояса резервуара, подвержено незначительным напряжениям сжатия $\sigma_{сж}$, обусловленным весом столба жидкости в резервуаре:

$$\sigma_{сж} = \rho_{ж} \cdot g \cdot H_{взл} = 1000 \cdot 9,8 \cdot 12 = 0,12 \text{ МПа},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; $H_{взл}$ – максимальная высота взлива.

Поэтому увеличивать ее толщину вряд ли целесообразно. В.Г. Шухов в работе [1] показал, что днище резервуара, лежащее на сплошном упругом основании (песке), будет тем рациональнее, чем меньше оно будет работать на изгиб, чем более гибким оно является. На стадии строительства стенку резервуара с внутренней и наружной сторон жестко приваривают к окрайке днища. Для новых резервуаров, согласно ГОСТ Р 59910–2008, выступ листов окрайки за стенку резервуара назначают в интервале 50–100 мм (рис. 1).



Рис. 1. Уторный шов РВСП-20000 м³, выполненный с применением сварочного комплекса для автоматической сварки плавящимся электродом в среде защитных газов

После завершения строительства РВС-20000 (рис. 1), под воздействием веса стенки и кровли, из-под резервуара выдавливается часть гидрофобного слоя, за счет чего узел сопряжения, жестко опираясь на железобетонное кольцо под стенкой, получается полностью заземленным.

Стенка РВС при максимальных взливах испытывает двухосное напряженное состояние, обусловленное действием кольцевых напряжений $\sigma_{кц}$, действующих в окружном направлении, и продольных напряжений $\sigma_{пр}$, действующих в меридиальном направлении. Величина продольных напряжений $\sigma_{пр}$ определяется весом стенки резервуара, крыши и оборудования на ней, а также снеговой нагрузкой. Нагрузка, вносящая основной вклад в кольцевые растягивающие напряжения $\sigma_{кц}$, определяется гидростатическим давлением хранимой

жидкости и давлением газовой фазы в незаполненной части резервуара. Изгибным напряжениям стенка резервуара не подвергается, т. к. тонкая стенка стального резервуара легко деформируется, не работая на изгиб (предполагается равномерное распределение напряжений по толщине стенки). Величину максимальных напряжений в области, удаленной от уторного шва (где нагрузка изменяется плавно), рассчитывают по безмоментной теории по величине максимальных кольцевых напряжений:

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{pR}{\delta} < R_{\text{расч}},$$

где p – суммарное давление, создаваемое гидростатическим давлением столба жидкости в резервуаре, и избыточным давлением газовой шапки; R – радиус резервуара; δ – толщина соответствующего пояса резервуара; $R_{\text{расч}}$ – расчетное сопротивление резервуарной стали.

Безмоментная теория не учитывает краевого эффект, возникающий в местах жесткого сопряжения стенки с днищем, где нагрузка изменяется скачкообразно.

В области, примыкающей к жестко заземленному уторному шву, возникают изгибающий момент $M_{\text{изг}} = X_1$ и горизонтальная (поперечная) сила $Q_{\text{гор}} = X_2$ (рис. 2), которые влияют на перераспределение усилий безмоментного состояния стенки резервуара. Учет изгибающих напряжений в уторе резервуара проводят по моментной теории оболочек. Вследствие криволинейности стенки резервуара и возникающих от этого растягивающих кольцевых напряжений $\sigma_{\text{кц}}$, препятствующих изгибу, напряжения, вызванные краевым изгибающим моментом, достаточно быстро затухают. Действительно, в заземленном узле сопряжения стенки с днищем влияние краевого эффекта становится равным нулю на удалении от узла сопряжения на расстояние $l_{\text{кз}}$ [2]:

$$l_{\text{кз}} \approx 0,6\sqrt{R_{\text{рез}} \cdot \delta_{\text{нип}}} = 0,6\sqrt{22,5 \cdot 0,02} = 0,4 \text{ м},$$

где $R_{\text{рез}}$ – радиус резервуара; $\delta_{\text{нип}}$ – толщина нижнего пояса. Напряжения и деформации, вызванные краевым эффектом, имеют локальный характер.

Согласно СНиП II-23-81 [3], краевой эффект существенно увеличивает напряженное состояние двухстороннего таврового сварного соединения стенки резервуара с днищем (рис. 2) и представляет серьезную опасность. В связи с этим представляет интерес вклад краевого эффекта в напряженное состояние узла сопряжения стенки с днищем, рассчитанное по моментной теории, по сравнению с напряженным состоянием нижнего пояса резервуара, рассчитанное по безмоментной теории.

Расчет уторного сварного шва резервуара с двумя угловыми швами, где возникают изгибающий момент и горизонтальная сила, проведем по моментной теории с учетом краевого эффекта. Величину катета уторного шва предварительно задают в пределах $0,3 \cdot t_{\text{окр}}$, где $t_{\text{окр}}$ – толщина окрайки. Расчетная схема сочленения стенки резервуара с окрайкой днища представлена на рис. 2, где $\delta_{\text{ст}}$ – толщина нижнего пояса стенки резервуара. Условие прочности уторного сварного шва определяется соотношением [4]:

$$Q_1 \leq \beta_f \cdot k_f \cdot m_f \cdot R_f,$$

где Q_1 – сила, срезающая сварной шов по наплавленному металлу; β_f – коэффициент сварного шва, принимаемый равным $\beta_f = 0,7$; k_f – катет сварного шва; m_f – коэффициент условий работы сварного шва, $m_f = 1,0$; R_f – расчетное сопротивление по металлу сварного шва (для электродов Э55 $R_f = 215$ МПа).

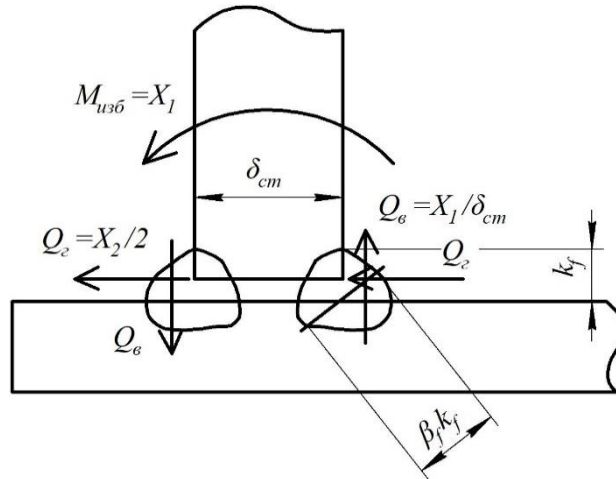


Рис. 2. Узел сопряжения стенки резервуара с дном с двумя угловыми сварными швами

Сила, срезающая сварной шов по наплавленному металлу, может быть рассчитана по уравнению [5]:

$$Q_1 = \sqrt{Q_v^2 + Q_g^2},$$

где Q_v и Q_g – соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие.

Изгибающий момент в узле сочленения равен произведению вертикальной составляющей силы на плечо $M_{изг} = Q_v \cdot \delta_{ст}$, а горизонтальную составляющую разделим на два шва $Q_g/2$.

Отсюда $Q_1 = \sqrt{\left(\frac{M_{изг}}{\delta_{ст}}\right)^2 + \left(\frac{Q_g}{2}\right)^2}$, обозначив $M_{изг} = X_1$ и $Q_g = X_2$, полу-

чим $Q_1 = \sqrt{\left(\frac{X_1}{\delta_{ст}}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{2}\right)^2}.$

Таким образом, в узле сопряжения стенки и дна резервуара остаются два неизвестных: изгибающий момент X_1 и горизонтальная сила X_2 , которые с помощью уравнений статики найдены быть не могут. Задача является дважды статически неопределенной. Недостающие уравнения можно получить на основе анализа совместной деформации стенки и дна с учетом фактического физического состояния узла сопряжения. В связи с этим для раскрытия статической неопределенности, для определения значений X_1 и X_2 , воспользуемся методом сил строительной механики [6]. Для этого составим два канони-

ческих уравнения, характеризующих условие совместности деформаций стенки резервуара и днища. Как уже было сказано (рис. 1), узел сопряжения стенки и днища является конструктивно жестким, и перемещений в нем быть не может. Поэтому перемещения по направлениям лишних (отброшенных) связей должны быть равны нулю. Изгибающий момент X_1 и горизонтальную силу X_2 определяют методом сил из решения системы канонических уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{ст} + \delta_{11}^{дн}) X_1 + \delta_{12}^{ст} \cdot X_2 + \Delta_{1p}^{ст} + \Delta_{1p}^{дн} = 0; \\ \delta_{21}^{ст} \cdot X_1 + \delta_{22}^{ст} \cdot X_2 + \Delta_{2p}^{ст} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для решения данной дважды статически неопределенной пространственной задачи необходимо сначала найти единичные перемещения δ_{ik} и грузовые члены Δ_{ik} стенки резервуара и днища, которые являются коэффициентами при неизвестных единичном моменте X_1 и единичной горизонтальной силе X_2 . В приведенной системе канонических уравнений $\Delta_{1p}^{ст}$ и $\Delta_{1p}^{дн}$ – единичные перемещения стенки и днища от действия X_1 и X_2 (рис. 3).

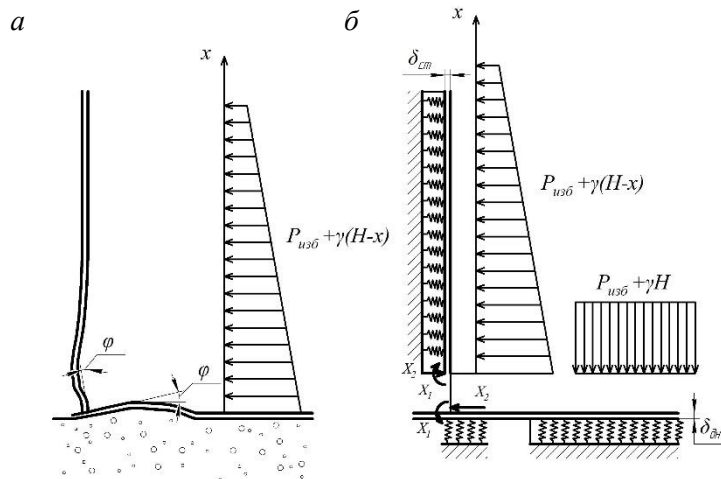


Рис. 3. Расчетная схема приложения нагрузок для узла сопряжения стенки резервуара и днища, решаемая методом сил:

а – исходная система – совместная деформация стенки и днища; б – основная система для расчета нижнего узла методом сил: $M_{изг} = X_1$ – изгибающий момент; $Q_r = X_2$ – поперечная сила

Так как сопротивление растяжению окраек днища значительно выше, чем изгибу, то фактически линейные деформации днища вдоль оси Ox равны нулю. В узле сопряжения стенки резервуара с днищем изгибающий момент $M_{изг} = X_1$, зависящий от толщины стенки нижнего пояса и толщины окрайки, коэффициента жесткости основания и от длины окрайки днища, выступающей за стенку (консоли). Размер выступающей части окрайки днища обычно не превышает 60 мм (в противном случае увеличивается краевой эффект) [7].

В приведенных канонических уравнениях каждое единичное перемещение δ_{11} , $\delta_{12} = \delta_{21}$, δ_{22} и перемещение от внешней нагрузки Δ_{1p} и Δ_{2p} состоит из суммы перемещений стенки резервуара и днища:

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{12}^{\text{ст}} + \delta_{12}^{\text{дн}} + \delta_{21}^{\text{ст}} + \delta_{21}^{\text{дн}}; \quad (2)$$

$$\delta_{22} = \delta_{22}^{\text{ст}} + \delta_{22}^{\text{дн}}; \quad (3)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21}; \quad (4)$$

$$\Delta_{1p} = \Delta_{1p}^{\text{ст}} + \Delta_{1p}^{\text{дн}}. \quad (5)$$

Для решения уравнения (1) необходимо найти единичные и грузовые перемещения стенки и днища, которые являются коэффициентами при неизвестных X_1 и X_2 . Для этого необходимо вначале рассчитать коэффициент постели стенки и днища резервуара [4].

Расчет произведем для резервуара РВС-20000 НПС «Александровская» Томской области, толщина нижнего пояса которого составляет $\delta_{\text{ст}} = 18$ мм, толщина окрайки $\delta_{\text{дн}} = 18$ мм. Радиус резервуара $R = 19,02$ м. Размер выступающей части окрайки днища $c = 0,06$ м.

1. Определение деформационных характеристик элементов РВС-20000.

Коэффициент постели стенки резервуара

$$k_{\text{ст}} = \frac{E \cdot \delta_{\text{ст}}}{R^2} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,018}{19,08^2} = 10,4 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3},$$

где $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ – модуль Юнга, Па.

Коэффициент постели днища резервуара

$$k_{\text{дн}} = \frac{E \cdot \delta_{\text{дн}}}{R^2} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,012}{19,08^2} = 6,9 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

Цилиндрическая жесткость стенки $D_{\text{ст}}$ и окрайки днища $D_{\text{дн}}$ резервуара:

$$D_{\text{ст}} = \frac{E \cdot \delta_{\text{ст}}^3}{12(1-\eta^2)} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,018^3}{12(1-0,3^2)} = 1,13 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\eta = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

$$D_{\text{дн}} = \frac{E \cdot \delta_{\text{дн}}^3}{12(1-\eta^2)} = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,012^3}{12(1-0,3^2)} = 0,33 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Коэффициент деформации стенки $m_{\text{ст}}$ и окрайки днища $m_{\text{дн}}$ резервуара:

$$m_{\text{ст}} = \sqrt[4]{\frac{k_{\text{ст}}}{4 \cdot D_{\text{ст}}}} = \sqrt[4]{\frac{10,4 \cdot 10^6}{4 \cdot 1,13 \cdot 10^5}} = 2,2 \text{ м}^{-1};$$

$$m_{\text{дн}} = \sqrt[4]{\frac{k_{\text{дн}}}{4 \cdot D_{\text{дн}}}} = \sqrt[4]{\frac{6,9 \cdot 10^6}{4 \cdot 0,33 \cdot 10^5}} = 2,69 \text{ м}^{-1}.$$

2. Расчет значений функций, введенных акад. А.Н. Крыловым [5]:

θ , ξ , ψ и ϕ для расчета балок на упругом основании:

$$\theta = e^{-m_{\text{дн}} \cdot c} \cos(m_{\text{дн}} \cdot c) = e^{-2,69 \cdot 0,06} \cos(2,69 \cdot 0,06) = 0,83; \quad (6)$$

$$\xi = e^{-m_{\text{дн}} \cdot c} \sin(m_{\text{дн}} \cdot c) = e^{-2,69 \cdot 0,06} \sin(2,69 \cdot 0,06) = 0,14; \quad (7)$$

$$\psi = \theta - \xi = 0,57 - 0,21 = 0,69; \quad (8)$$

$$\varphi = \theta + \xi = 0,57 + 0,21 = 0,97. \quad (9)$$

Быстро затухающие периодические функции А.Н. Крылова (содержащие коэффициент $e^{-m_{\text{дн}} \cdot c}$) свидетельствуют о том, что в точках за пределом узкой зоны действия краевого эффекта, возникающей в узле сопряжения, моментной силой можно пренебречь (принцип Сен-Венана).

3. Определение значений коэффициентов и перемещений, входящих в систему канонических уравнений (1), на основе полученных значений функций А.Н. Крылова [2]:

$$\begin{aligned} \delta_{11}^{\text{ст}} &= \frac{1}{m_{\text{ст}} \cdot D_{\text{ст}}} = \frac{1}{2,2 \cdot 1,13 \cdot 10^5} = 3,89 \cdot 10^{-6}, \text{ Н}^{-1}; \\ \delta_{12}^{\text{ст}} = \delta_{21}^{\text{ст}} &= \frac{1}{2m_{\text{ст}}^2 \cdot D_{\text{ст}}} = \frac{1}{2 \cdot 2,2^2 \cdot 1,13 \cdot 10^5} = 0,84 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{М}}{\text{Н}}; \\ \delta_{22}^{\text{ст}} &= \frac{1}{2m_{\text{ст}}^3 \cdot D_{\text{ст}}} = \frac{1}{2 \cdot 2,2^3 \cdot 1,13 \cdot 10^5} = 0,38 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{М}^2}{\text{Н}}; \\ \Delta_{1p}^{\text{ст}} &= \frac{\rho_{\text{неф}} \cdot g}{k_{\text{ст}}} = \frac{860 \cdot 9,8}{11,5 \cdot 10^6} = 7,33 \cdot 10^{-4}, \end{aligned}$$

где $\rho_{\text{неф}} = 860,0 \text{ кг/м}^3$ – плотность нефти,

$$\begin{aligned} \Delta_{2p}^{\text{ст}} &= \frac{\rho_{\text{неф}} \cdot g}{k_{\text{ст}}} H = \frac{860 \cdot 9,8 \cdot 18}{11,5 \cdot 10^6} = 131,94 \cdot 10^{-4}, \text{ м}; \\ \delta_{11}^{\text{дн}} &= \frac{1}{m_{\text{дн}} \cdot D_{\text{дн}}} \frac{1 + \varphi^2 + 2\theta^2}{4} = \frac{1}{2,69 \cdot 0,33 \cdot 10^5} \frac{1 + 0,94 + 2 \cdot 0,69}{4} = 2,78 \cdot 10^{-6}, \frac{1}{\text{Н}}; \\ \Delta_{1p}^{\text{дн}} &= -\frac{q_0 m_{\text{дн}}}{2k_{\text{дн}}} (1 - \varphi \cdot \psi + 2\theta \cdot \xi) = \\ &= \frac{1,62 \cdot 10^5 \cdot 2,69}{2 \cdot 6,9 \cdot 10^6} [1 - 0,97 \cdot 0,69 + 2 \cdot 0,83 \cdot 0,14] = -6,3 \cdot 10^{-4}, \text{ м}, \end{aligned}$$

где $q_0 = n_1 \cdot \rho_{\text{неф}} \cdot H + n_2 \cdot P_{\text{изб}} = 1,05 \cdot 860 \cdot 9,8 \cdot 18 + 1,2 \cdot 2000 = 1,62 \cdot 10^5, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Подставив в систему канонических уравнений (1) величины рассчитанных коэффициентов и перемещений, определим значения неизвестных X_1 и X_2 :

$$\begin{cases} (3,69 \cdot 10^{-6} + 2,78 \cdot 10^{-6}) X_1 + 0,84 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 + 733 \cdot 10^{-6} - 630 \cdot 10^{-6} = 0, \\ 0,84 \cdot 10^{-6} \cdot X_1 + 0,38 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 + 13194 \cdot 10^{-6} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Окончательно получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} 6,47 \cdot X_1 + 0,84 \cdot X_2 + 103 = 0, \\ 0,84 \cdot X_1 + 0,38 \cdot X_2 + 13194 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Откуда $X_1 = M_{\text{изг}} = 8164,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $X_2 = Q_{\Gamma} = -29764,8 \text{ Н}$.

После определения силовых факторов $M_{\text{изг}}$ и Q_{Γ} проведем расчет на прочность таврового сварного шва и стенки резервуара в точке сопряжения с днищем с учетом краевого эффекта.

4. Проверка таврового сварного шва на прочность.

Расчетная схема таврового соединения днища и нижнего пояса стенки резервуара представлена на рис. 2 и 3. Условие прочности таврового сварного шва:

$$Q \leq \beta_f \cdot k_f \cdot m_f \cdot R_f = 0,7 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 215000000 = 1806 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

где β_f – коэффициент сварного шва (принят по СНиП II-23-81, табл. 34); k_f – катет сварного шва; m_f – коэффициент условий работы сварного шва; R_f – расчетное сопротивление сварного шва для электродов Э50.

Силу Q , срезающую сварной шов под действием рассчитанных значений изгибающего момента $M_{\text{изг}}$ и горизонтальной сил Q_{Γ} , рассчитаем по формуле

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{изг}}}{\delta_{\text{ст}}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{\Gamma}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{8,1}{20 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{29,7}{2}\right)^2} = 405,02 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Условие прочности сварного шва выполняется: $405,02 \leq 1806$.

Проверку прочности стенки резервуара в точке сопряжения с днищем с учетом краевого эффекта на основе рассчитанных значений изгибающего момента $M_{\text{изг}} = X_1$ и горизонтальной силы $Q_{\Gamma} = X_2$ произведем по формуле

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_{\text{ст}}} + \frac{Q_{\Gamma}}{F_{\text{ст}}} = \frac{6M_{\text{изг}}}{\delta_{\text{ст}}^2} + \frac{Q_{\Gamma}}{\delta_{\text{ст}}} \leq R_{\text{расч}};$$

$$R_{\text{расч}} = \frac{\sigma_{\text{в}} \cdot m}{k_1 \cdot k_{\text{н}}} = \frac{490 \cdot 0,75}{1,34 \cdot 1,05} = 262,5 \text{ МПа},$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности стали 09Г2С; m – коэффициент условий работы; k_1 – коэффициент надежности по материалу; $k_{\text{н}}$ – коэффициент надежности по назначению.

Максимальная величина напряжений в узле сопряжения, обусловленная

$$W_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}^2}{6} = \frac{0,018^2}{6} = 66,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $W_{\text{ст}}$ – момент сопротивления сечения нижнего пояса стенки резервуара; $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки нижнего пояса.

Краевой эффект особенно опасен в условиях низких температур, когда уменьшение вязкости в зоне концентрации напряжений уторного сварного шва приводит к его хрупкому разрушению. Поэтому главная трудность расчета, учи-

тывающего краевые напряжения, заключается в назначении расчетных допускаемых напряжений $R_{\text{расч}}$. Чем более пластична и податлива сталь, тем менее опасны краевые напряжения. Согласно типовым проектам на строительство резервуаров РВС-20000, четыре нижних, наиболее нагруженных пояса, изготавливают из малоуглеродистой низколегированной стали 09Г2С ($R_{\text{расч}} = 262,5$ МПа), а верхние, менее нагруженные, – из стали Ст3сп ($R_{\text{расч}} = 197,2$ МПа).

Максимальное допускаемое напряжение в узле сопряжения стенки резервуара с днищем, вызываемое действием изгибающего момента и горизонтальной силы, равно

$$\sigma_{\text{max}}^{\text{м}} = \frac{6M_{\text{изг}}}{\delta_{\text{ст}}^2} + \frac{Q_{\text{г}}}{\delta_{\text{ст}}} = \frac{6 \cdot 8164,6}{0,018^2} + \frac{29764,8}{0,018} = 151196296 + 1653600 = 152,36 \text{ МПа}.$$

Условие прочности выполняется, т. к. $152,36 \leq 262,5$. Соединение стенки резервуара с днищем с помощью двух непрерывных сварных швов обеспечивает прочность узла сопряжения:

$$n = \frac{R_{\text{расч}}}{\sigma_{\text{max}}^{\text{м}}} = \frac{262,5}{152,36} = 1,72.$$

Представляет интерес, как соотносятся максимальные напряжения, рассчитанные по безмоментной теории (рис. 4, а), по сравнению с моментной теорией с учетом краевого эффекта (рис. 4, б).

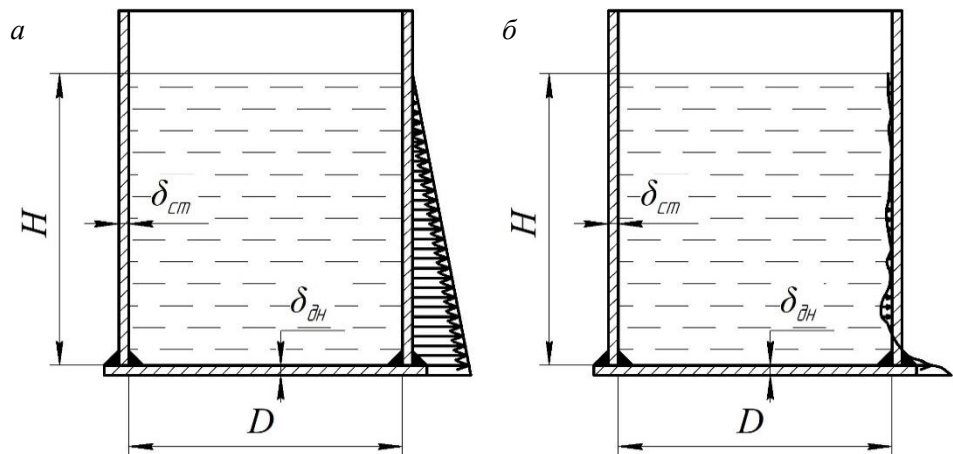


Рис. 4. Распределение напряжений в узле сопряжения стенки резервуара с днищем: а – эпюра напряжений от гидростатического давления; б – эпюра напряжений от действия изгибающего момента и горизонтальной силы

Максимальная величина напряжений по безмоментной теории в узле сопряжения этого же резервуара РВС-20000 высотой $H_{\text{рез}} = 12$ м, с радиусом $R_{\text{рез}} = 19,02$ м и толщиной стенки нижнего пояса $\delta_{\text{ст}} = 18$ мм, высотой залива $H_{\text{вл}} = 10$ м при избыточном давлении в газовой шапке резервуара $P_{\text{изб}} = 2000$ Па равна

$$\sigma_{\max}^{\text{б/м}} = \frac{[n_1 \cdot \rho \cdot g \cdot H_{\text{взл}} + n_2 \cdot P_{\text{изб}}] R_{\text{рез}}}{n \cdot \delta_{\text{ст}}} =$$

$$= \frac{[1,05 \cdot 1000 \cdot 9,8 \cdot 10 + 1,2 \cdot 2000] \cdot 19,02}{0,7 \cdot 0,018} = 169,23 \text{ МПа},$$

где $n_1 = 1,05$ – коэффициент надежности по нагрузке гидростатического давления; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $n_2 = 1,2$ – коэффициент надежности по нагрузке от избыточного давления; $n = 0,7$ – коэффициент условий работы для нижнего пояса резервуара.

Условие прочности также выполняется: $169,23 \leq 262,5$.

Сопоставление напряжений, полученных по моментной и безмоментной теориям для защемленного узла сопряжения стенки резервуара с днищем, свидетельствует о том, что условие прочности в обоих случаях выполняется. Результаты расчета на основе аналитических зависимостей двух теорий оболочек вращения дают удовлетворительную сходимость: максимальные напряжения в узле сопряжения стенки резервуара с днищем, рассчитанные по моментной и безмоментной теориям, практически совпадают. Однако с учетом повышающих коэффициентов запаса напряжения, полученные по безмоментной теории, на 11,1 % превышают величину максимальных напряжений, полученных по моментной теории с учетом краевого эффекта, вклад которого в области уторного шва распространяется на узкую зону (0,4 м). Поэтому оценку запаса прочности уторного шва проведем по результатам расчета по безмоментной теории:

$$n = \frac{R_{\text{расч}}}{\sigma_{\max}} = \frac{262,5}{169,23} = 1,55.$$

Величина максимальных напряжений, полученных по безмоментной теории, не достигает значений допустимых напряжений для резервуарной стали 09Г2С, запас прочности по пределу текучести составляет

$$\sigma_m / \sigma_{\max}^{\text{б/м}} = 270 / 169,23 = 1,6,$$

что соответствует ГОСТ Р58622–2019 [8].

Проведенный расчет показывает, что основная причина разрушения узла сочленения стенки РВС с днищем не в его конструктивных просчетах, а в подготовке основания («пятак») под строительство резервуара. В процессе эксплуатации недопустимо большие неравномерные осадки основания резервуара провоцируют появление трещин в области жестко защемленного уторного сварного шва и их распространение по стенке и днищу. В большинстве расследованных случаев аварийных разрушений РВС-20000 источником хрупкой трещины является сварной шов в уторном узле, что связано с наличием в сварном шве неизбежных концентраторов напряжений: малых трещин, микровключений и цепочек газовых пор, практически не выявляемых в процессе дефектоскопического контроля при проведении строительно-монтажных работ. Процесс зарождения концентраторов напряжений

в уторном сварном шве происходит уже в процессе охлаждения шва после сварки. Во время остывания в сварном шве и в зоне термического влияния, нагретой до температуры 900 °С, происходит фазовое превращение аустенита в феррит и перлит. Этот переход в результате вторичной кристаллизации связан с увеличением объема, за счет чего в сварном шве и зоне термического влияния появляются большие сварочные напряжения, провоцирующие значительные неравномерные деформации. По этой причине, за счет большого объемного эффекта процесса вторичной кристаллизации, при возникновении зародышей ферритной и перлитной фаз образуются зародыши микротрещин. При проведении сварочно-монтажных работ при отрицательной температуре, при быстром охлаждении шва, аустенит способен переходить в мартенсит – хрупкую модификацию феррита. Эта проблема практически решена за счет изготовления нижних поясов РВС-20000 из стали 09Г2С. Низкоуглеродистая феррито-перлитная сталь 09Г2С малочувствительна к скорости охлаждения и не склонна к закаливанию с образованием мартенситной структуры. Появление микротрещин в уторном сварном шве может быть также связано с плохой защитой расплавленного металла от атмосферных газов, в том числе и когда не обеспечено минимально допустимое содержание влаги в окружающей шов атмосфере, в обмазке электродов и на свариваемых кромках. Под воздействием температуры и сварочного тока в зоне сварки протекает реакция электролитического разложения молекул воды на водород и кислород: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 \uparrow + \text{O}_2 \uparrow$. Присутствие кислорода в сварочной ванне приводит к образованию оксидов железа, а водорода – к наводороживанию металла. Недостаточное раскисление и локальное наводороживание ухудшают прочностные характеристики резервуарной стали, способствуют ее охрупчиванию и увеличивают вероятность образования микротрещин при сварке протяженного многослойного сварного шва в жестко закрепленном уторе. Стадия возникновения микротрещин реализуется в охрупченной зоне сварного шва, вторая стадия – их нестабильное распространение – происходит под влиянием внутренних напряжений, обусловленных неравномерными просадками по периметру днища резервуара. При просадке основания резервуара, по мере возрастания напряжений, микротрещины развиваются в макротрещины разной длины. Рост более длинных трещин опережает рост коротких: длинные трещины «экранируют» более короткие и зажимают их. Рост коротких трещин при этом останавливается, а длинные продолжают расти – формируется магистральная трещина. На развитие магистральной трещины в области уторного сварного шва при циклическом его нагружении за счет постоянно меняющегося взлива в резервуаре существенное влияние оказывает постоянно присутствующая здесь влага. Сорбированный слой влаги на поверхности растущей трещины с содержащимися в ней агрессивными газами облегчает деформацию и развитие трещины (эффект Ребиндера). Иницирующее действие адсорбции состоит в том, что поверхностно-активные вещества понижают поверхностную энергию стали и тем самым способствуют зарождению пластических сдвигов и развитию магистральной трещины при меньших напряжениях.

При визуальном анализе излома в трещинах первого пояса по уторному шву наблюдается сильно окисленная хрупкая составляющая, в некоторых местах заметен хрупко-вязкий переход от окисленного очага зарождения трещины к более светлой зоне вязкого долома. На верхних поясах резервуара излом преимущественно вязкий. Магистральная трещина на нижнем поясе распространяется параллельно уторному шву (перпендикулярно максимальным гидростатическим напряжениям), в основном по зоне термического влияния. Просадки основания резервуара приводят к дополнительному увеличению напряжений в уторном сварном шве в направлении максимальной горизонтальной силы $Q_1 = X_2$ (рис. 2), что приводит к ускорению развития трещины как по длине, так и в глубину. Существенным фактором, провоцирующим образование трещин в уторном шве, является достижение максимальных эксплуатационных нагрузок в условиях низких температур, когда прочностные характеристики сталей снижаются. Сами трещины являются концентраторами напряжений (острый надрез): при приближении к вершине острой трещины, когда расстояние от вершины трещины $t \rightarrow 0$, напряжение у вершины σ , согласно теории упругости, стремится к бесконечности $\sigma \rightarrow \infty$ по закону:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{t}},$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений в данный момент времени.

Чем острее и длиннее трещина, тем ниже сопротивляемость уторного шва разрушению. Аварии на резервуарах по причине низкотемпературного разрушения уторного сварного шва происходят преимущественно в осенне-зимний период, когда температура понижается до минус 35–45 °С (для условий нефтедобывающих районов Западной Сибири). В этих условиях высокопрочная резервуарная сталь 09Г2С не может предотвратить хрупкое разрушение уторного сварного шва с последующим разливом нефти. Разлив нефти через растущую магистральную трещину приводит к лавинообразному отрыву стенки от днища по утору и разрушению стенки практически на всю высоту резервуара. Возникает мощная реактивная сила, действующая в направлении, противоположном изливаемому потоку, вызывающая дополнительную динамическую нагрузку, под воздействием которой катастрофическое разрушение стенки резервуара по высоте происходит как по вертикальным сварным швам, так и по основному металлу. Стенка отрывается от днища и крыши, смещается с железобетонного кольца основания с последующим обрушением крыши.

В заключение следует отметить максимальные напряжения в узле сопряжения стенки с днищем, полученные на основе результатов аналитического исследования краевого эффекта в задаче изгиба стенки, действующего РВС-20000 по моментной теории в сопоставлении с результатами, полученными по безмоментной теории, практически совпадают. Увеличивать жесткость узла сопряжения путем увеличения толщины стенки нижнего пояса и толщины окрайки днища нецелесообразно. Основная причина разрушения узла сочленения стенки РВС с днищем не в его конструктивных просчетах,

а в подготовке основания под строительство резервуара. Проблема обостряется в связи с необходимостью строительства и эксплуатации РВС в Западной Сибири на слабонесущих, переувлажненных и многолетнемерзлых грунтах. В связи с этим основная задача состоит, прежде всего, в совершенствовании технологии строительства основания для монтажа РВС на переувлажненных и многолетнемерзлых грунтах с последующим постоянным контролем геодезических отметок основания в процессе эксплуатации резервуаров, совершенствовании технологии сварки протяженных многослойных тавровых сварных швов (в т. ч. при отрицательных температурах) и методик их дефектоскопического контроля на строительной площадке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шухов В.Г. Строительная механика / под ред. А.Ю. Ишлинского. Москва : Наука, 1977. 193 с.
2. Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н. Металлические конструкции. Москва, 1961. 776 с.
3. СНиП II-23-81. Стальные конструкции : утв. Постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144) (в редакции от 29 декабря 1986 г.) (с изменениями и дополнениями). 178 с.
4. Металлические конструкции. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения / под ред. В.В. Горева. Москва : Высшая школа, 2005. 544 с.
5. Крылов А.Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании. Ленинград : Изд-во Академии наук СССР, 1931. 154 с.
6. Беленя Е.И., Балдин В.А., Ведерников Г.С. и др. Металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1986. 560 с.
7. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Москва : Высшая школа, 1986. 706 с.
8. ГОСТ Р 58622–2019. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Методика оценки прочности, устойчивости и долговечности резервуара вертикального стального. Издание официальное. Москва : Стандартинформ, 2019. 58 с.

REFERENCES

1. Shukhov V.G. Stroitel'naya mekhanika [Theory of structure]. A.Yu. Ishlinskii, ed., Moscow: Nauka, 1977. 193 p. (rus)
2. Streletskii N.S., Geniev A.N., Belenya E.I., Baldin V.A., Lessig E.N. Metallicheskie konstruksii [Metal construction]. Moscow, 1961. 776 p. (rus)
3. SNiP II-23-81. Stal'nye konstruksii: utv. postanovleniem Gosstroya SSSR ot 14 avgusta 1981 g. N 144) (v redaktsii ot 29 dekabrya 1986 g.) (s izmeneniyami i dopolneniyami) [SNiP II-23-81 "Steel structures"]. 1981. 178 p. (rus)
4. Gorev V.V. (Ed.) Metallicheskie konstruksii [Metal construction], vol. 3. Spetsial'nye konstruksii i sooruzheniya [Special structures]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 544 p. (rus)
5. Krylov A.N. O raschete balok lezhashchikh na uprugom osnovanii [Analysis of beam on elastic foundation]. Leningrad: Izd. Akademii nauk SSSR, 1931. 154 p. (rus)
6. Belenya E.I., Baldin V.A., Vedernikov G.S., et. al. Metallicheskie konstruksii [Metal construction]. Moscow: Stroiizdat, 1986. 560 p. (rus)
7. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. Stroitel'naya mekhanika [Theory of structure]. Moscow: Vysshaya shkola, 1986. 706 p. (rus)
8. GOST R 58622–2019. Magistral'nyi truboprovodnyi transport nefi i nefteproduktov. Metodika otsenki prochnosti, ustoychivosti i dolgovechnosti rezervuara vertikal'nogo stal'nogo [Major pipeline transport of oil and oil products. Method for assessing strength, stability and durability of vertical steel tank]. Moscow: Standartinform, 2019. 58 p. (rus)

Сведения об авторах

Хижняков Валентин Игнатьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, val@tpu.ru

Негодин Александр Викторович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, Semerka.82@mail.ru

Бакшанский Роман Юрьевич, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rbakshanskiy@mail.ru

Authors Details

Valentin I. Khizhnyakov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, val@tpu.ru

Aleksandr V. Negodin, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, Semerka.82@mail.ru

Roman Yu. Bakshanskii, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rbakshanskiy@mail.ru