



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2020, ТОМ 26, НОМЕР 1, 25–35
УДК 624.014.27:624.046.4

(20)-0405-1

УТОЧНЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

В. Ф. Мущанов¹, М. Н. Цепляев², А. В. Зубенко³

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.*

E-mail: ¹ volodymyr.mushchanov@mail.ru, ² m.n.cepliaev@donnasa.ru, ³ a.v.zubenko@donnasa.ru

Получена 11 февраля 2020; принята 27 марта 2020.

Аннотация. Данная работа является логическим продолжением исследования рационального расположения колец жёсткости на цилиндрических стенках вертикальных резервуаров. В частности рассмотрена задача учёта фактического распределения ветрового давления на цилиндрическую стенку резервуара с использованием метода конечных элементов. Это позволило выявить резервы несущей способности оболочки по сравнению с нормативными значениями критических напряжений. Резервы обусловлены уменьшенными значениями критических напряжений, которые дают аналитические выражения в связи с приведением формы ветрового потока к равномерному кольцевому сжатию. Используя уточнённую методику расчёта коэффициента запаса устойчивости стало возможным определить коэффициенты его приращения при различном количестве колец жёсткости. Полученные уточнения, позволяют ввести коэффициенты к нормативным выражениям, определяющим значения кольцевых критических нагрузок потери устойчивости, через которые назначается рациональный шаг усиливающих колец жёсткости. Рассмотрены случаи оболочки с идеальной геометрией и в случае наличия дефекта в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический резервуар, ветровая нагрузка, напряжения, метод конечных элементов, цилиндрическая оболочка, локальные несовершенства.

УТОЧНЕННЯ НОРМАТИВНИХ ВИРАЗІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬЦЕВИХ КРИТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПРИ ДІЇ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В. П. Мущанов¹, М. М. Цепляев², Г. В. Зубенко³

*ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.*

E-mail: ¹ volodymyr.mushchanov@mail.ru, ² m.n.cepliaev@donnasa.ru, ³ a.v.zubenko@donnasa.ru

Отримана 11 лютого 2020; прийнята 27 березня 2020.

Анотація. Робота є логічним продовженням дослідження раціонального розташування кілець жорсткості на циліндричних стінках вертикальних резервуарів. Зокрема розглянуто задачу урахування фактичного розподілу вітрового тиску на циліндричну стінку резервуара з використанням методу кінцевих елементів. Це дозволило виявити резерви несучої здатності оболонки в порівнянні з нормативними значеннями критичних напружень. Резерви обумовлені зменшеними значеннями критичних напружень, які дають аналітичні вирази в зв'язку з приведенням форми вітрового потоку до рівномірного кільцевого стиску. Використовуючи уточнену методику розрахунку коефіцієнта запаса стійкості, стало

можливим визначити коефіцієнти його збільшення при різній кількості кілець жорсткості. Отримані уточнення дозволяють ввести коефіцієнти до нормативних виразів, що визначають значення кільцевих критичних навантажень втрати стійкості, через які призначається раціональний крок підсилювальних кілець жорсткості. Розглянуто випадки оболонки з ідеальною геометрією і в разі наявності дефекту у вигляді кутастості вертикального монтажного зварного шва.

Ключові слова: вертикальний циліндричний резервуар, вітрове навантаження, напруження, метод кінцевих елементів, циліндрична оболонка, локальні недосконалості.

CLARIFICATION OF NORMATIVE EXPRESSIONS FOR DETERMINING ANNULAR CRITICAL STRESSES OF BUCKLING UNDER THE INFLUENCE OF WIND LOAD

Volodymyr Mushchanov¹, Maxim Tsepliaev², Anna Zubenko³

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

E-mail: ¹ volodymyr.mushchanov@mail.ru, ² m.n.cepliaev@donnasa.ru, ³ a.v.zubenko@donnasa.ru

Received 11 February 2020; accepted 27 March 2020.

Abstract. This article is a logical continuation of the study of the rational arrangement of stiffness rings on the cylindrical walls of vertical tanks. In particular, the problem of taking into account the actual distribution of wind pressure on the cylindrical wall of the tank using the finite element method is considered. This allowed us to determine the reserves of the bearing capacity of the shell in comparison with the standard values of critical stresses. The reserves are provided due to reduced critical stresses, which give analytical expressions in connection with the reduction of the shape of the wind flow to uniform ring compression. Using the improved methodology for calculating the safety factor, it became possible to determine the coefficients of its increment for a different number of stiffness rings. The obtained refinements allow us to enter coefficients to the normative expressions that determine the values of the ring critical loads of stability loss, through which the rational step of the reinforcing rings of stiffness is assigned. Cases of the shell with ideal geometry and in the case of a defect in the form of the angularity of the vertical weld are considered.

Keywords: vertical cylindrical tank, wind load, stress, finite element method, cylindrical shell, local imperfections.

Введение

Критический анализ нормативных документов и других литературных источников показал, что все современные методики усиления кольцами жёсткости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров вытекают из формулы для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости. При этом сама формула получена ещё в начале прошлого столетия и рассматривает вариант равномерного внешнего давления. Фактически же резервуары находятся под действием неравномерного внешнего давления, и фактическая величина критической нагрузки может отличаться, что приводит к неоптималь-

ному размещению колец жёсткости. Полученные результаты в других работах, выполняемых в рамках решения данного вопроса, позволили определить рациональное расположение колец, однако вопрос уточнения самих формул для определения критических напряжений остаётся открытым. Один из вариантов его решения приведен в данной статье. Таким образом, целью данного исследования является: определение поправочных коэффициентов к нормативным формулам для определения величины кольцевых критических напряжений при расположении колец жёсткости по уточнённой методике.

1. Этапы развития методики определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости

Первые зафиксированные экспериментальные исследования по изучению потери устойчивости оболочек теории были проведены английским учёным В. Фейербёрном в 1858 г. Теоретические выражения для определения кольцевых критических выражений потери устойчивости цилиндрических оболочек были получены в начале XX века. Изначально рассматривался вариант бесконечно длинной оболочки, ввиду размера которой характер закрепления концов не влияет на поведение при потере устойчивости. Для решения задачи устойчивости оболочки конечной длины, которыми являются стенки ВЦР, необходимо было ввести учёт граничных условий. Впервые такое решение было получено для шарнирного опирания краёв оболочки длиной l (рисунок1).

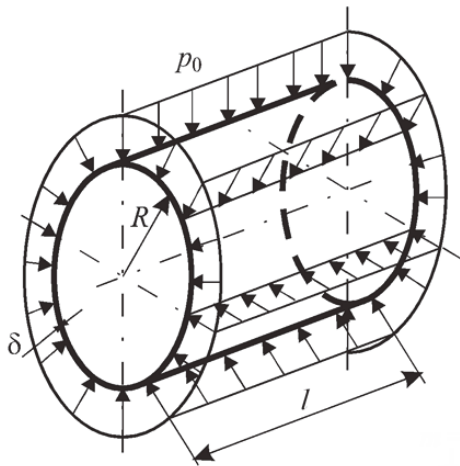


Рисунок 1. Расчётная схема оболочки длиной l под внешним давлением.

Рассмотрен вариант решения, приведенный в работе Н. А. Алфутова «Основы расчёта упругих систем» [1], далее будут приведены его основные пункты. Для принятых граничных условий:

при $x = 0$: $\omega = 0, \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$; при $x = l$: $\omega = 0, \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$
 также при внешнем давлении $p_0 = \text{const}$, усилия в оболочке будут равны: $N_x(0) = 0, N_{xy}(0) = 0, N_y(0) = p_0 \cdot R$. В таком случае уравнение устойчивости принимает вид:

$$D \cdot \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \omega + \frac{E \cdot h}{R^2} \cdot \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + q \cdot R \cdot \nabla^2 \nabla^2 \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

где D, h, R – диаметр, толщина и радиус оболочки;
 q – внешнее давление;
 ω – функция прогиба;
 ∇ – определяется по формуле (2),
 E – модуль упругости стали.

Значение оператора в формуле (1) определяется по формуле (2):

$$\nabla^2 (*) = \frac{\partial^2 (*)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (*)}{R^2 \partial \varphi^2} = 0, \quad (2)$$

где R – радиус оболочки.
 Тогда, если задать прогиб в виде определённого ряда данных и подставив его в уравнение (1), можно получить равенство для определения собственных значений наружного давления p_0 . При этом p_0 зависит от числа полувольт в окружном (n) и осевом (m) направлениях. Случай, когда $m = 1$, приводит к минимальному значению p_0 , следовательно, он считается основным. Отыскивая минимум полученного равенства при варьировании параметров h/R и R/l для оболочек средней длины, которыми являются цилиндрические стенки ВЦР, итоговое выражение примет вид – формула (3):

$$p_{кр} = 0,856 \cdot \frac{E}{(1-\mu^2)} \cdot \frac{R}{l} \cdot \left(\frac{h}{R} \right)^{\frac{5}{2}}, \quad (3)$$

где E, h, R – аналогично формуле (1);
 l – длина оболочки;
 μ – коэффициент Пуассона.

Соответственно, из данного выражения можно получить расстояние между закреплениями, при котором потеря устойчивости гарантированно не произойдёт. Указанная формула получена по результатам исследований: в 1914 году Мизеса [2] и Бубнова [3], в 1913-1915 гг. Саусвела [4], в 1932 г. – Флюгге [5], в 1934 г. – Папковича [6]. В 1934 году Винденбург и Триллинг в своей работе упростили выражения, полученные Мизесом. При этом допущения о равной толщине и действии равномерного внешнего давления оставались в силе. По результатам работ 1914–1934 годов в практику реального проектирования и

расчёта цилиндрических оболочек на устойчивость вошла формула для определения верхнего критического давления, получившая название Мизеса-Папковича. В 1963 году американский учёный McGrath преобразовал и незначительно уточнил выражение, имеющее название формула Саусвелла-Папковича, в части учёта ступенчатой толщины стенки.

Рассматривая другие современные литературные источники и публикации, которые в меньшей степени касаются установления зависимостей, но затрагивают анализ работы стенки резервуара, усиленной кольцами жесткости, можно выделить работы авторов [7–10]. Во всех рассматриваемых работах авторы отмечают эффективность применения горизонтальных колец жесткости для повышения устойчивости стенки, находящейся под внешним поперечным давлением. Под внешним поперечным давлением чаще всего подразумевается ветровая нагрузка и вакуум. Также во всех источниках кольца жесткости располагаются по разному принципу. Причины и рациональность такого выбора остаются не ясными. Остаётся открытым и вопрос границ эффективного применения таких методов усиления.

2. Реализация в нормативных документах

В Еврокоде устойчивость подкрепленных оболочек предлагается оценивать по указаниям раздела 11 EN 1993-4-2. Суть методики – в определении допустимой высоты стенки, в пределах которой нет необходимости устанавливать кольца жесткости H_p (формула 4), эквивалентной высоты стенки H_E (формула 5).

$$H_p = 0,46 \left(\frac{E}{p_{Ed}} \right) \left(\frac{t_{\min}}{r} \right)^{2,5} rK, \quad (4)$$

$$H_E = \sum h \left(\frac{t_{\min}}{t} \right)^{2,5}, \quad (5)$$

где t_{\min} – номинальная толщина самого тонкого пояса;

t – толщина расчетного пояса;

h – высота пояса;

p_{Ed} – расчетное боковое давление (ветер + вакуум);

K – коэффициент, учитывающий осевое давление;

r – радиус оболочки.

Требуемое количество колец определяется из отношения H_E/H_p , определённых. Располагать кольца жесткости рекомендуется с равным шагом по высоте H_E .

Рассмотрены также два нормативных документа РФ: обязательный к соблюдению СП 16.13330.2011 и носящий рекомендательный характер документ СТО-СА-03-002-2009. Критические кольцевые напряжения, для резервуаров рассматриваемых объёмов, определяются по формуле (6):

$$\sigma_{cr,2} = 0,55E(r/l)(t/r)^{3/2}, \quad (6)$$

где l – высота стенки резервуара;

t – толщина стенки;

r – радиус оболочки.

Учёт наличия колец жесткости (КЖ) достигается подстановкой в формулу 6 вместо длины оболочки l расстояния между подкрепляющими рёбрами s .

В СТО критические кольцевые напряжения, для резервуаров рассматриваемых объёмов, определяются по формуле (7):

$$\sigma_{cr,2} = 0,55 \frac{r}{H_r} \frac{E}{\sqrt{\delta^3}}. \quad (7)$$

В формуле 7 в качестве расчетной высоты стенки используется редуцированная высота стенки H_r , определяемая по формуле (8), и величина δ по формуле (9):

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{t_{mr}}{t_{ir}} \right)^{2,5}, \quad (8)$$

$$\delta = \frac{r}{t_{mr}}, \quad (9)$$

где t_{mr} – расчетная толщина самого тонкого пояса стенки;

t_{ir} – расчетная толщина i -го пояса стенки;

h_i – высота i -го пояса стенки;

r – радиус оболочки.

Учёт наличия КЖ достигается подстановкой в формулу (7) величины H_r , вычисленной для расстояния между подкрепляющими рёбрами.

В СТО-СА-03-002-2009 место установки промежуточного кольца рекомендуется выбирать с учетом обеспечения равенства значений H_r (формула 8) для участков стенки ниже и выше кольца и быть не ближе 150 мм от горизонтального сварного шва во избежание влияния сварочных напряжений.

3. Методы

Определение рационального расположения колец жесткости предлагается анализировать на примере вертикальных цилиндрических резервуаров объёмом 10 000–30 000 м³ со стационарной сферической кровлей. Принципиальным отличием от существующих подходов будет учёт фактического распределения ветрового потока при определении критических значений поперечной нагрузки и кольцевых напряжений потери устойчивости оболочки

Общая методология исследований состоит в следующем:

- 1) создание и экспериментальная верификация численных моделей резервуаров различных объёмов и конструктивных вариантов. Для численных исследований будет использоваться комплекс ЛИРА-САПР 2015 R4;
- 2) на основе верифицированной модели ВЦР путём системного последовательного моделирования различного положения колец жесткости на стенках ВЦР различных габаритов при наличии и без дефектов определить такое положение, при котором устойчивость стенки оказывается максимальной – рисунок 2.
- 3) выполнение аналогичного пункту 2 исследования для оболочки с характерным типовым дефектом в виде вертикального монтажного сварного шва резервуаров, монтируемых по методу рулонирования – рисунок 2б;
- 4) определение границ рациональности применения КЖ для резервуаров с различными параметрами исходя из требования обеспечения устойчивости при минимальной металлоёмкости конструкции при действии кольцевых сжимающих нагрузок;
- 5) на основе полученных данных внести дополнения в существующую методику расчёта резервуаров в части расчёта устойчивости стенок оболочек, усиленных кольцевыми рёбрами жесткости.

Пункты 1–4 были выполнены ранее, их результаты приведены в работах [11–14]. В данной работе приведено решение выполнения пункта 5, а именно формирование уточнённой методики размещения колец и определение поправочных коэффициентов на её основе.

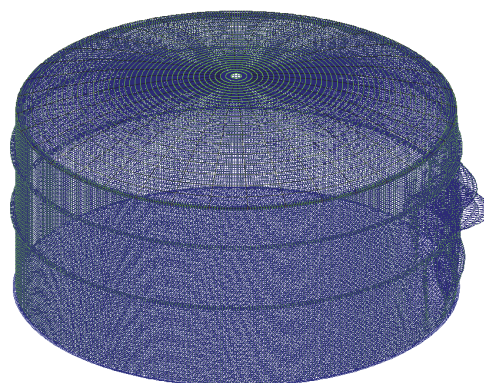
Для создания адекватной численной модели решалась задача экспериментальной верифика-

ции результатов расчёта на устойчивость в применяемом расчётном комплексе на трёх характерных моделях резервуаров под действием внешнего давления. Было проведено сравнение исследуемых величин и формы потери устойчивости цилиндрической оболочки. Экспериментальные напряжения измерялись при помощи тензорезистивного метода, устройством преобразования сигналов тензодатчиков служили шесть модулей ввода МВ110-224.4ТД. В конечные величины значения напряжений преобразовывались через компьютерную программу, написанную в оболочке MasterScada.

4. Рекомендации по уточнению требуемого шага колец для вновь проектируемых резервуаров

В работе [14] были определены две принципиальные зависимости между гибкостями участков,

а)



б)



Рисунок 2. Вертикальный цилиндрический резервуар: а) численное моделирование потери устойчивости резервуара с двумя КЖ; б) дефект угловатости вертикального монтажного сварного шва.

при которых КЗУ стенки оказывается максимальным (они представлены в виде выражений 10 и 11):

$$1) \text{ для случая размещения одного КЖ: } \lambda_1/\lambda_2 = 0,74; \quad (10)$$

$$2) \text{ для случая размещения двух и более КЖ: } \lambda_1/\lambda_2 = 0,85 \text{ и } \lambda_i/\lambda_{i+1} = 0,8. \quad (11)$$

Это позволило сделать вывод о рациональном количестве и необходимой гибкости участков, выраженных через параметр λ_1 , при расположении колец жёсткости на стенке резервуара. Как отмечено ранее, все зависимости получены при учёте реальной эпюры ветрового давления в сочетании с нагрузкой от вакуума. Исходя из условия обеспечения максимальной устойчивости определено:

- для резервуаров с $r/H = 0,79$ КЗУ стенки резко возрастает при гибкости λ_1 первого участка менее 570;
- для резервуара с $r/H = 1,11$ при λ_1 менее 330;
- для резервуара с $r/H = 1,27$ при λ_1 менее 270.

Исходя из условия минимального расхода стали, определено:

- для резервуаров с $r/H = 0,79$ оптимальное количество КЖ не более двух, что соответствует гибкости первого участка более 540;
- для резервуара с $r/H = 1,11$ оптимальное количество КЖ также не более трех, что соответствует гибкости первого участка более 280;
- для резервуара с $r/H = 1,27$ оптимальное количество КЖ не более трех, что соответствует гибкости первого участка более 245.

Величина λ_1 для каждого из рассматриваемых резервуаров будет равна:

- 1) для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с $r/H = 0,79$, гибкость $\lambda_1 = h/t_{\text{экв}} = 540...570$;
- 2) для резервуаров с $r/H = 1,11$, гибкость $\lambda_1 = 280...330$;
- 3) для резервуаров с $r/H = 1,27$, гибкость $\lambda_1 = 245...270$.

Таким образом, определены выражения и параметры величины λ_1 , позволяющие выполнить оптимальную расстановку КЖ для резервуара с идеальной геометрией. Верхняя граница диапазона параметра λ_1 ограничена требованием обеспечения максимального КЗУ, а нижняя – экономической целесообразностью.

5. Рекомендации по уточнению требуемого шага колец для эксплуатируемых резервуаров в случае наличия дефекта угловатости вертикального монтажного сварного шва

Используя полученные формулы, определена аналитическая зависимость (12) для определения правой границы рекомендуемой гибкости в зависимости от габаритов резервуара и параметров дефекта:

$$\lambda_{1(\text{деф})} = 1106,8 \left(\frac{r}{H} \right)^2 - 2884,1 \left(\frac{r}{H} \right) + 2137,7 + k_{\text{деф}} \left(\frac{B}{h} - 20 \right), \quad (12)$$

где $k_{\text{деф}}$ – при $r/H = 0,79...1,11$ равно 0,333;
при $r/H = 1,27$ равно 0,5;

B и h – параметры дефекта.

Следовательно, исходя из полученных данных, диапазон рекомендуемых гибкостей λ_1 для оболочки с дефектом в виде угловатости сварного шва следует принимать:

- 1) для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с $r/H = 0,79$, гибкость $\lambda_1 = \lambda_{10} = 540... \lambda_{1(\text{деф})}$;
- 2) для резервуаров с $r/H = 1,11$, гибкость $\lambda_1 = 280... \lambda_{1(\text{деф})}$;
- 3) для резервуаров с $r/H = 1,27$, гибкость $\lambda_1 = 245... \lambda_{1(\text{деф})}$.

6. Определение коэффициентов к нормативным выражениям для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости

Учитывая, что реализация предлагаемой методики рационального расположения горизонтальных кольцевых ребер жесткости позволяет не только обеспечить снижение металлоемкости конструкции, но одновременно повысить величину критических кольцевых напряжений, то при использовании разработанной методики размещения колец это позволяет ввести уточняющий повышающий коэффициент к формулам для определения кольцевых критических напряжений, приведенным в нормативных документах СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017, при сохранении используемого в нормах уровня КЗУ. Важно отметить, что уточнения в методику расчёта ВЦР затрагивают только формулы для определения кольцевых критических напряжений цилиндрических оболочек

рассматриваемых габаритов от действия фактического распределения ветрового потока и вакуума. При этом существующие коэффициенты безопасности, учитывающие другие формы, типы дефектов, ошибки монтажа и другие факторы, не корректируются.

Для получения поправочных коэффициентов к значению критических кольцевых напряжений выполнены аналитические и численные расчёты КЗУ при размещении от 0 до 5 КЖ и проведено их сравнение. Поскольку в аналитических формулах заложены определенные коэффициенты надежности, которые не описываются в явном виде, то сравниваются не сами значения КЗУ, а их увеличение по отношению к первоначальному (через коэффициенты приращения). Коэффициент приращения определялся как отношение i -го КЗУ к нулевому, где i – количество КЖ.

Предварительно были определены приращения для КЗУ при их вычислении аналитически и численно – таблица 1.

Далее определялись коэффициенты приращения $K(2)$ – приращение КЗУ, определенных численным методом, при постановке КЖ по сравнению с первоначальным, для ВЦР без дефекта (формула 13) и с дефектом (формула 14). Результаты расчётов приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

$$K_{(2)} = \frac{KЗУ_{числ,i}}{KЗУ_{числ,0}}, \quad (13)$$

где $KЗУ_{числ,i}$ – численные значения коэффициента запаса устойчивости стенки при i -ом количестве колец жёсткости;

$KЗУ_{числ,0}$ – численные значения коэффициента запаса устойчивости стенки без колец жёсткости.

$$K_{(2),ДЕФ} = \frac{KЗУ_{числ,i}}{KЗУ_{числ,0}}, \quad (14)$$

где $KЗУ_{числ,i}$ – численные значения коэффициента запаса устойчивости стенки при i -ом количестве колец жёсткости;

$KЗУ_{числ,0}$ – численные значения коэффициента запаса устойчивости стенки без колец жёсткости.

И далее определены приращения по сравнению с нормативными случаями. Коэффициенты приращения КЗУ, определенных аналитическим методом, при постановке КЖ по сравнению с первоначальным по нормативному документу СП16.13330.2017 определяется по формуле (15). Полученные значения приведены в таблице 4.

$$K_{(1),СП} = \frac{KЗУ_{ан,0}}{KЗУ_{ан,i}}, \quad (15)$$

где $KЗУ_{ан,i}$ – аналитический коэффициент запаса устойчивости стенки при i -ом количестве колец жёсткости;

$KЗУ_{ан,0}$ – аналитический коэффициент запаса устойчивости стенки без колец жёсткости.

Коэффициенты приращения КЗУ, определенных аналитическим методом, при постановке КЖ по

Таблица 1. КЗУ стенки для ВЦР различных объёмов

Объём ВЦР	Методика вычисления КЗУ	КЗУ стенки при количестве КЖ:					
		0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	СП16,13330,2017	1,00	1,96	2,63	3,26	3,84	4,21
	СТО СА 03-002-2009	1,06	2,09	2,69	3,34	4,14	4,90
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (без дефекта)	1,14	2,35	3,07	3,92	4,94	5,78
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (с дефектом)	1,13	2,27	2,93	3,70	4,73	5,68
20 тыс. м ³	СП16,13330,2017	1,01	1,86	2,66	3,39	4,73	5,88
	СТО СА 03-002-2009	1,06	1,96	2,81	3,57	4,94	6,07
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (без дефекта)	1,16	2,25	3,30	4,30	6,02	7,12
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (с дефектом)	1,14	2,21	3,15	4,03	5,77	6,99
30 тыс. м ³	СП16,13330,2017	1,29	3,16	4,24	4,76	5,89	6,90
	СТО СА 03-002-2009	1,37	3,35	4,49	5,03	6,17	7,16
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (без дефекта)	1,35	3,72	5,16	5,77	7,69	9,22
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (с дефектом)	1,33	3,60	4,93	5,48	7,37	9,05

сравнению с первоначальным по нормативному документу СТО СА 03-002-2009 определяется по формуле (16). Полученные значения приведены в таблице 5.

$$K_{(1),\text{СТО}} = \frac{KЗУ_{\text{ан},0}}{KЗУ_{\text{ан},i}}, \quad (16)$$

где $KЗУ_{\text{ан},i}$ – аналитический коэффициент запаса устойчивости стенки при i -ом количестве колец жёсткости;

$KЗУ_{\text{ан},0}$ – аналитический коэффициент запаса устойчивости стенки без колец жёсткости.

6.1. Поправочные коэффициенты в случае отсутствия дефекта

Поправочные коэффициенты определялись сравнением приращений коэффициентов запаса устойчивости для ВЦР с наиболее невыгодными параметрами рассматриваемого дефекта и без него для двух нормативных документов.

Таблица 2. Коэффициент приращения $K_{(2)}$ (для ВЦР без дефекта)

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	2,05	2,68	3,43	4,31	5,05
20 тыс. м ³	1,00	1,94	2,85	3,71	5,19	6,14
30 тыс. м ³	1,00	2,76	3,83	4,28	5,70	6,84

Таблица 3. Коэффициент приращения $K_{(2),\text{ДЕФ}}$ – прирост численных КЗУ при постановке КЖ по сравнению с первоначальным (для ВЦР с дефектом)

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	2,01	2,60	3,28	4,20	5,03
20 тыс. м ³	1,00	1,93	2,76	3,52	5,04	6,11
30 тыс. м ³	1,00	2,72	3,72	4,14	5,56	6,83

Таблица 4. Коэффициент приращения $K_{(1),\text{СП}}$

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	1,93	2,51	3,19	3,86	4,23
20 тыс. м ³	1,00	1,85	2,64	3,37	4,71	5,85
30 тыс. м ³	1,00	1,97	2,64	3,28	3,86	4,23

Результаты расчётов приведены в таблицах 6 и 7, где $K_{(1)}$ – коэффициент приращения КЗУ при расчёте по аналитической зависимости нормативных документов; $K_{(2)}$ – коэффициент приращения КЗУ, определяемый расчётом при помощи комплекса ЛИРА-САПР 2015 г4.

В итоге в качестве поправочного коэффициента предлагается взять минимальное значение приращения. Следовательно, при расположении колец по приведенной методике к аналитической формуле для определения кольцевых критических напряжений, приведенной в СТО СА 03-002-2009, допустимо ввести повышающий коэффициент:

- 1,04 (при наличии рассмотренного дефекта);
- 1,05 (без дефекта).

6.2. Поправочные коэффициенты в случае наличия дефекта

Аналогичные расчёты были проведены для резервуаров, имеющих дефект в виде угловатости

Таблица 5. Коэффициент приращения $K_{(1),\text{СТО}}$

КЖ, шт	1,00	1,98	2,54	3,16	3,92	4,64
10 тыс. м ³	1,00	1,85	2,64	3,36	4,65	5,72
20 тыс. м ³	1,00	2,45	3,29	3,68	4,52	5,24
30 тыс. м ³	1,00	1,98	2,54	3,16	3,92	4,64

Таблица 6. Отношение $K_{(2)}/K_{(1)}$ для СП16.13330.2017

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	1,06	1,07	1,08	1,12	1,19
20 тыс. м ³	1,00	1,05	1,08	1,10	1,10	1,05
30 тыс. м ³	1,00	1,40	1,45	1,31	1,48	1,62

Таблица 7. Отношение $K_{(2)}/K_{(1)}$ для СТО СА 03-002-2009

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	1,05	1,06	1,08	1,10	1,09
20 тыс. м ³	1,00	1,05	1,08	1,10	1,12	1,07
30 тыс. м ³	1,00	1,13	1,16	1,16	1,26	1,30

вертикального монтажного сварного шва с наиболее невыгодными параметрами, определёнными предварительно. Результаты вычислений поправочного коэффициента приведены в таблицах 8 и 9, в которых $K_{(1)}$ – коэффициент приращения КЗУ при расчёте по аналитической зависимости нормативных документов; $K_{(2)}$ – коэффициент приращения КЗУ, определяемый расчётом при помощи комплекса ЛИРА-САПР 2015 г4.

Таблица 8. Отношение $K_{(2),\text{деф}}/K_{(1)}$, СП для норм СП16.13330.2017

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	1,05	1,05	1,07	1,09	1,19
20 тыс. м ³	1,00	1,05	1,05	1,06	1,07	1,04
30 тыс. м ³	1,00	1,38	1,41	1,26	1,44	1,61

Таблица 9. Отношение $K_{(2),\text{деф}}/K_{(1)}$, СТО для СТО СА 03-002-2009

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м ³	1,00	1,04	1,04	1,06	1,07	1,08
20 тыс. м ³	1,00	1,04	1,05	1,05	1,08	1,07
30 тыс. м ³	1,00	1,11	1,13	1,12	1,23	1,27

Для определения кольцевых критических напряжений по формуле, приведенной в СП16.13330.2017, допустимо ввести повышающий коэффициент:

- 1,05 (при наличии рассмотренного дефекта);
- 1,07 (без дефекта).

Выводы

- 1) По результатам выполненных исследований для вновь проектируемых резервуаров объёмами 10...30 тыс. м³ со стенкой переменной толщины с идеальной геометрией установлены зависимости, позволяющие выполнить рациональную расстановку колец жесткости, а именно:
 - для случая размещения одного КЖ: $\lambda_1/\lambda_2 = 0,74$;
 - для случая размещения двух и более КЖ: $\lambda_1/\lambda_2 = 0,85$ и $\lambda_i/\lambda_{i+1} = 0,8$.
- 2) На основе зависимостей, полученных в результате проведенных исследований, предложены значения повышающих коэффициентов для аналитического вычисления значений кольцевых критических напряжений по нормам СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017 в случае использования методики размещения колец, приведенной в данной работе. Повышающие коэффициенты определены для случаев оболочки с идеальной геометрией и при наличии дефекта в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва.

Литература

1. Алфутов, Н. А. Устойчивость цилиндрической оболочки, подкрепленной поперечным силовым набором и нагруженной внешним равномерным давлением [Текст] / Н. А. Алфутов // Инж. сб. АН СССР. – 1956. Т. 23, № 23. С. 36–46.
2. Mises, R. Der kritische Aussendruck zylindrischer [Текст] / R. von Mises // Zeit. V.D.I. 1914. Vol. 58. P. 750–755.
3. Бубнов, И. Г. Строительная механика корабля. Часть II. [Текст] / И. Г. Бубнов. – СПб. : Типография Морского министерства, 1914. – 309 с.
4. Southwell, R. V. On the Collapse of Tubes by External Pressure [Текст] / R. V. Southwell // Phil. Mag. 1913. P. 687–698.
5. Flügge, W. Die stabilität der Kreiszyinderschale [Текст] / W. Flügge // Ing.-Archiv. 1932. № 5(3). P. 463–506.

References

1. Alfutov, N. A. Stability of a cylindrical shell supported by a transverse force set and loaded with uniform external pressure [Text]. In: *Eng. collection of the Academy of Sciences of the USSR*. 1956. Vol. 23, № 23. P. 36–46. (in Russian)
2. Mises, R. Der kritische Aussendruck zylindrischer [Text]. In: *Zeit. V.D.I.* 1914. Vol. 58. P. 750–755. (in German)
3. Bubnov, I. G. Ship mechanics. Part II. [Text]. SPb. : Typography of the Ministry of the sea, 1914. 309 p. (in Russian)
4. Southwell, R. V. On the Collapse of Tubes by External Pressure [Text]. In: *Phil. Mag.* 1913. P. 687–698. (in English)
5. Flügge, W. Die stabilität der Kreiszyinderschale [Text]. In: *Ing.-Archiv.* 1932. № 5(3). P. 463–506. (in German)

6. Папкович, П. Ф. Теория упругости [Текст] / П. Ф. Папкович. – М. : Оборонгиз, 1939. – 640 с.
7. Bu, F. On the Rational Design of the Top Wind Girder of Large Storage Tanks [Текст] / F. Bu, C. Qian // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 99. P. 91–96.
8. Burgos, C. A. Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder [Текст] / C. A. Burgos, J. C. Batista-Abreu, H. D. Calabró [et. al.] // *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 91. P. 29–37.
9. Егоров, Е. А. Устойчивость вертикальных стальных резервуаров с кольцевыми ребрами жесткости [Текст] / Е. А. Егоров, К. И. Дмитренко // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2013, № 69. С. 182–186.
10. Teng, J. G. Buckling of Thin Metal Shells [Текст] / J. G. Teng, J. M. Rotter. – London : CRC Press, 2003. – 520 p.
11. Мущанов, В. Ф. Анализ численных и аналитических значений коэффициента запаса устойчивости стенки резервуара [Текст] / В. Ф. Мущанов, М. Н. Цепляев // *Вестник ДонНУСА*. 2018. Вып. 2018-3(131) Здания и конструкции с использованием новых материалов и технологий. С. 105–115.
12. Мущанов, В. Ф. Исследования напряженно-деформированного состояния уторного узла в вертикальных цилиндрических резервуарах объемом 10 000 и 50 000 м³ [Текст] / В. Ф. Мущанов, Д. И. Роменский // *Металлические конструкции*. 2012. Т. 18, № 1. С. 61–71.
13. Мущанов, В. Ф. Напряжения в кровле резервуара, состоящего в группе, при действии ветра [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2018. № 5(68). С. 36–51.
14. Мущанов, В. Ф. Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жесткости [Текст] / В. Ф. Мущанов, М. Н. Цепляев // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2018. № 9(72). С. 58–73.
6. Papkovich, P. F. Elasticity theory [Text]. M. : Oborongiz, 1939. 640 p. (in Russian)
7. Bu, F.; Qian, C. On the Rational Design of the Top Wind Girder of Large Storage Tanks [Text]. In: *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 99. P. 91–96. (in English)
8. Burgos, C. A.; Batista-Abreu, J. C.; Calabró, H. D. [et. al.]. Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder [Text]. In: *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 91. P. 29–37. (in English)
9. Yegorov, Ye. A.; Dmitrenko, K. I. Stability of vertical steel tanks with annular stiffeners [Text]. In: *Construction, materials science, mechanical engineering*. 2013, № 69. P. 182–186. (in Russian)
10. Teng, J. G.; Rotter J. M. Buckling of Thin Metal Shells [Text]. London : CRC Press. 2003. 520 p. (in English)
11. Mushchanov, V. F.; Tcepliaev, M. N. Analysis of numerical and analytical values of the reservoir wall safety factor [Text]. In: *Proceedings of the DNACA*. 2018. Issue 2018-3(131) Buildings and structures using new materials and technologies. P. 105–115. (in Russian)
12. Mushchanov, V. F.; Romensky, D. I. Investigations of the stress-strain state of the mash node in vertical cylindrical reservoirs of volume 10 000 and 50 000 m³ [Text]. In: *Metal constructions*. 2012. T. 18, № 1. С. 61–71. (in Russian)
13. Mushchanov, V. F.; Zubenko, A. V.; Tcepliaev, M. N. Stresses in the roof of the tank, consisting of a group, under the influence of wind [Text]. In: *Construction of unique buildings and structures*. 2018. № 5(68). P. 36–51. (in Russian)
14. Mushchanov, V. F.; Tcepliaev, M. N. Ensuring the stability of the walls of the tanks based on the rational arrangement of stiffening rings [Text]. In: *Construction of unique buildings and structures*. 2018. № 9(72). P. 58–73. (in Russian)

Мущанов Владимир Филиппович – доктор технических наук; профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины и Украинской академии наук, член-корреспондент Академии архитектуры Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Цепляев Максим Николаевич – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчёт и проектирование вертикальных цилиндрических резервуаров, повышение эффективности методик расчёта оболочек на устойчивость.

Зубенко Анна Васильевна – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, численные методы расчёта тонких оболочек положительной гауссовой кривизны.

Мушчанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки, проректор з наукової роботи ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції», академік Академії будівництва України і Української академії наук, член-кореспондент Академії архітектури України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Цепляєв Максим Миколайович – асистент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування вертикальних циліндричних резервуарів, підвищення ефективності методик розрахунку оболонок на стійкість.

Зубенко Ганна Василівна – асистент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження впливу вітрового навантаження на споруди, що мають кругову циліндричну поверхню, чисельні методи розрахунку тонких оболонок позитивної гауссової кривизни.

Mushchanov Volodymyr – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures». the academician of the Civil Engineering Academy in Ukraine and the Academy of Sciences of Ukraine, an associate member of the Academy of Architecture of Ukraine. Scientific interests: include the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

Tsepliaev Maxim – Assistant, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: calculation and design of vertical cylindrical tanks, increasing the efficiency of shell calculation methods for stability.

Zubenko Anna – Assistant, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: study of the impact of wind loads on structures with a circular cylindrical surface, numerical methods for calculating thin shells of positive Gaussian curvature.