

УДК 624.953:624.046.4

В. Ф. МУЩАНОВ, М. Н. ЦЕПЛЯЕВ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА

Аннотация. Изучается изменение напряженного состояния и коэффициента запаса устойчивости стенки вертикального цилиндрического резервуара при размещении горизонтальных колец жесткости по нормам Евросоюза и Российской Федерации. Основной нагрузкой является ветровая с учетом реального распределения потока. Целью исследования является получение адекватной конечно-элементной модели для дальнейшего изучения влияния колец жесткости на устойчивость стенки резервуара. Аналитические значения коэффициентов запаса устойчивости определяются по методикам, приведенным в нормативных документах Евросоюза и РФ. Численные значения возникающих напряжений и коэффициентов запаса устойчивости определяются методом конечных элементов. Для этого используется расчетный комплекс ЛИРА-САПР 2015 R4. В результате было определено влияние постановки колец жесткости на величину критических и действующих напряжений. Также определены численные и аналитические значения коэффициентов запаса устойчивости при нормативном размещении колец жесткости.

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

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные цилиндрические резервуары являются распространенными конструкциями, наиболее часто используемыми для хранения нефти, нефтепродуктов, воды и технологических жидкостей. В связи с этим проектированию и расчету таких конструкций уделяется большое внимание, и все же есть ряд вопросов, которые не оговариваются в достаточной мере. В статье [10] рассмотрены аналитические методы расчета на устойчивость стенок резервуаров согласно нормативным документам различных стран, по результатам сравнения которых были определены различия между аналитическими запасами по устойчивости. При этом было отмечено, что в нормах Евросоюза и РФ отсутствуют подробные методики расположения колец жесткости. Возможно, этим в значительной мере и вызвана редкость применения таких методов усиления стенки в отечественной практике.

Таким образом, имеет смысл провести дополнительные исследования и уточнить методику размещения таких колец. Для этого в первую очередь необходимо определить какие коэффициенты запаса устойчивости обеспечивает нормативное расположение колец жесткости. А также как постановка колец влияет на напряженное состояние стенки резервуара. Соответственно, требуется создать конечно-элементную (КЭ) модель, по которой можно будет судить об изменении КЗУ в зависимости от расположения колец жесткости. Для верификации такой модели требуется сравнить КЗУ, полученные методом конечных элементов и аналитически (по инженерной методике рассматриваемых нормативных документов).

1. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является изучение изменения напряженного состояния и коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) стенки вертикального цилиндрического резервуара, при усилении стенки горизонтальными кольцами жесткости (КЖ).

Основными задачами данного исследования будет:

- сравнить возникающие напряжения в стенке резервуара при наличии и отсутствии колец жёсткости, расположенных по нормам Евросоюза и РФ;
- вычислить аналитические значения коэффициентов запаса устойчивости для неподкреплённой и усиленной КЖ стенки типового резервуара согласно СП 16.13330.2011 (далее СП) и Еврокоду;
- сравнить полученные аналитические КЗУ с вычисленными в программе ЛИРА-САПР 2015 R4 (провести верификацию модели).

2. ПОДБОР СЕТКИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА

Одним из основных вопросов при использовании программных комплексов в расчетах пространственных конструкций, основывающихся на методе конечных элементов (МКЭ), является обеспечение достоверности полученных результатов. В первую очередь это должно быть обеспечено выбором адекватного размера конечных элементов.

2.1 Создание конечно-элементной модели

В качестве исследуемого объекта рассматривался типовой резервуар объёмом 20 000 м³. Геометрические размеры, толщина поясов и их количество приняты согласно типовому проекту [8]. Для данного исследования применялся программный комплекс ЛИРА-САПР 2015 R4. Конечно-элементная модель резервуара сформирована в трехмерном виде. Для моделирования основных конструктивных элементов (стенка, днище с окрайкой, опорное кольцо) использованы четырехугольные элементы оболочки № 41 (размер конечных элементов обосновывается в п. 2.3). Поскольку опорное кольцо задано пластинчатыми элементами в местах его стыка с рёбрами купола, для правильной работы узла используется объединение перемещений. Ребристо-кольцевой купол (РКК) выполнен стержнями. Днище закреплено по всей площади от вертикальных и горизонтальных перемещений.

Обеспечение сходимости будет выполнено из условия равенства полученных аналитически и по МКЭ кольцевых напряжений от совместного действия ветра и вакуума.

Величины нагрузок и выражение для аналитического определения кольцевых напряжений приняты по нормативным документам Европейского Союза [4, 5]. Более подробное описание процесса сбора нагрузки, её формы и полученных значений на аналогичный резервуар, приводится в статье [10].

2.2 Анализ сходимости

Для подбора требуемой сетки КЭ было выполнено 7 моделей резервуаров с различной разбивкой сетки конечных элементов, нагруженных расчетным сочетанием нагрузок, формирование которых описано в п. 2.2. Результаты сравнения на примере анализа величин кольцевых напряжений в уровне 2-го пояса резервуара приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа сходимости для обоснования расчетной схемы

№ расчетной схемы	Характеристика расчетной схемы		Кольцевые напряжения (МПа)		Δ_{4-5} , (%)
	Размер КЭ стенки (см)	Количество КЭ стенки	Линейная мембранная теория	МКЭ	
1	83,6×71,6	3 750	1 021,76	1 140	10,40
2	46,9×39,8	12 015		1 110	7,90
3	32,6×27,5	24 960		1 080	5,40
4	25×21,06	42 585		1 040	1,80
5	20,3×17	64 890		1 060	3,60
6	17,1×14,3	91 875		1 062	3,80
7	14,7×12,3	123 540		1 070	4,50

Из таблицы 1 было определено, что для случая 4 величины напряжений, полученные МКЭ и аналитически, отличаются менее чем на 2 %. Таким образом, для построения модели резервуара с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 будет использоваться конечный элемент с размерами 25 (ширина, см) × 21,06 (высота, см).

3. СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА В ЛИРА-САПР 2015 R4

И в Ерокоде [2, 3] и в СП [7] в качестве одного из методов обеспечения устойчивости стенки предлагается использование колец жесткости. Как уже отмечалось в статье [10] в указанных нормативных документах имеются определенные различия по требованию к расположению, конструктиву и учету в расчетах колец жесткости. Одной из задач данного исследования является проверить влияние наличия КЖ, сконструированных и расположенных согласно соответствующим нормативным документам, на возникающие напряжения и КЗУ методом конечных элементов. Для этого, исходя из предварительных аналитических расчетов, были определены требуемые поперечные сечения КЖ и их количество на стенке рассматриваемой модели резервуара. Затем выполнено их моделирование пластинчатыми элементами с учетом всех конструктивных элементов и выполнена сборка уже смоделированного резервуара с кольцами жесткости в двух вариантах:

- расположение и сечение КЖ согласно СП;
- расположение и сечение КЖ согласно Еврокоду.

В п. 4.1 и 4.2 более подробно описан этот процесс.

3.1 Создание КЭ модели с кольцами жёсткости согласно нормам РФ

Согласно п. 11.2.4 [7] кольца жесткости должны располагаться с шагом не менее половины радиуса оболочки. При этом более подробных пояснений не приводится, хотя для большинства резервуаров объемом более 20 000 м³ данное требование невыполнимо, так как радиус таких конструкций в 1,5 и более раз больше высоты. Таким образом, для рассматриваемого резервуара с высотой стенки 18 м и диаметром 39,9 м минимально допустимый шаг составляет 9,975 м. То есть для рассматриваемого резервуара размещение КЖ согласно [7] не представляется возможным, однако в исследовательских целях расположим одно кольцо на высоте 9,975 м от уровня земли. Тогда участок над кольцом будет равен 8,025 м что на 2,5 м меньше допустимой величины.

Требования к конструктиву колец жесткости также приводятся в п. 11.2.4 [7], в общем, должно быть обеспечено условие устойчивости КЖ в своей плоскости. Данное условие обеспечивается выполнением неравенства п. 7.1.3 [СП] (формула 1):

$$\frac{N}{\varphi AR_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где N – максимальное сжимающее усилие от действия ветра и вакуума (определяется аналитически);

φ – коэффициент устойчивости;

A – площадь поперечного сечения КЖ;

R_y – расчетное сопротивление стали С245;

γ_c – коэффициент условий работы, равен 1.

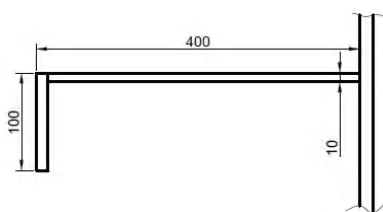


Рисунок 1 – Поперечное сечение кольца жёсткости по СП.

Расчетная длина стержня, при расчете по формуле 1, должна приниматься $l_{ef} = 1,8r$ (r – радиус оболочки), при этом в сечение ребра следует включать участки оболочки с каждой стороны от оси ребра, а условная гибкость стержня не должна превышать 6,5, что определяет достаточно широкую конструкцию кольца. Других требований, в том числе к подкрепляющим ребрам, не приводится. С учетом требований формулы 1 и распространенных типовых решений сечение кольца жесткости было принято следующим (рис. 1).

Также были смоделированы подкрепляющие ребра для колец жесткости, поскольку СП [7] никаких конкретных указаний по данному вопросу не даёт, шаг, форма и толщина ребер приняты соглас-

но рекомендациям [12], шаг ребер составляет 750 мм, а толщина 10 мм.

Кольцо жесткости было смоделировано в расчетном комплексе ЛИРА и в режиме сборки соединено с моделью резервуара.

3.2 Создание КЭ модели с расстановкой КЖ и определение их поперечного сечения по Еврокоду

В общем Еврокод предлагает два варианта расчета резервуаров на устойчивость. Один из них (EN 1993-1-6 [2]) ориентирован на использование МКЭ, второй EN 1993-4-2 – упрощенный [3], для которого приведены аналитические расчетные формулы. При этом указания по размещению кольцевых

ребер жесткости и их учёту в расчете на устойчивость приведены только в упрощенной методике согласно [3]. В то же время основная методика не вводит никаких ограничений, однако не даёт и пояснений, как влияет наличие КЖ на предельно допустимые напряжения.

Следовательно, расположение и подбор сечения КЖ будут осуществлены по методике, приведенной в упрощенном расчете [3], реализуемом в следующей последовательности:

– определяется высота, при превышении которой может произойти потеря устойчивости (формула 2):

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

– по формуле 3 определяется высота от верха стенки, в границах которой можно не устанавливать КЖ:

$$H_p = 0,46 \left(\frac{E}{p_{Ed}} \right) \left(\frac{t_{\min}}{r} \right)^{2,5} rK, \quad (3)$$

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.

Для заданных исходных данных было получено: $H_E = 13$ м, $H_p = 5,28$ м. Таким образом, для данного ВЦР, высота стенки которого 18 м, необходимо разместить два кольца жесткости, в пределах высоты НЕ. Однако пункт 11.3.2 (12) [3] требует пересчёта расстояния от верха стенки до КЖ, если толщина пояса, к которому прикрепляется КЖ, больше минимальной. Пересчёт производится по формуле 11.33 [3]. В результате расчётов кольца жёсткости должны располагаться на расстоянии 5,9 м и 12,6 м от верха стенки резервуара.

Подбор поперечного сечения КЖ, производится по формуле 4. В СП [7] указано, что КЖ необходимо считать односторонним ребром жёсткости, в Еврокоде [2] таких рекомендаций нет, поэтому осевые моменты инерции определялись относительно геометрического центра тяжести КЖ.

$$I_{R,j} \geq 2 \frac{N_{Rj,Ed} r^2}{E m_B^2}. \quad (4)$$

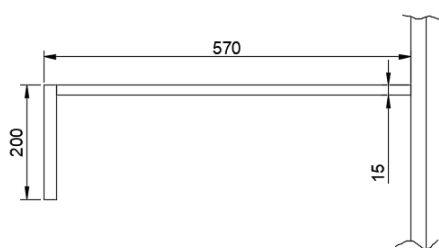


Рисунок 2 – Сечения КЖ по ЕН.

Сечение КЖ, полученное по требованиям Еврокода, изображено на рисунок 2.

Далее в расчетном комплексе была выполнена сборка колец жесткости с моделью резервуара, фрагмент полученной стенки приведён на рисунке 3.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ЛИРА-САПР 2015 R4

Вертикальные цилиндрические резервуары рассчитываются на устойчивость в условиях отсутствия хранимого продукта и соответственно наличия вакуума, при этом основной, как правило, является ветровая нагрузка. Для задач данного исследования в качестве расчетного сочетания принято сочетание собственного веса, ветра и вакуума. Коэффициенты сочетания нагрузок будут назначаться позже в зависимости от рассматриваемых норм.

Для полноценного анализа запасов устойчивости, которые дают рассматриваемые нормы, следует выполнить расчет резервуаров МКЭ с моделированием всех предлагаемых вариантов ветровой нагрузки на цилиндрический в плане объект. Как отмечалось в п. 2.2, Еврокод предлагает моделировать ветер в одном из двух вариантов – упрощенная (равномерное сжатие по кольцу) и реальная эпюра ветрового давления (изменяется в плане и по высоте). СП [7] предлагают только реальную эпюру ветрового давления.

Моделирование реальной эпюры ветрового давления становится отдельной задачей. Это вызвано отсутствием, как в программе ЛИРА-САПР 2015 R4, так и в других подобных расчётных комплексах возможности моделировать ветровую нагрузку на каждый КЭ при известном множестве

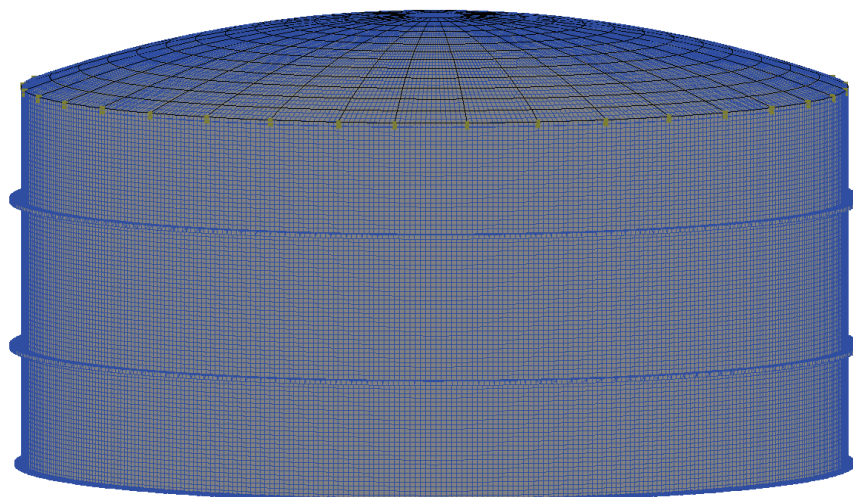


Рисунок 3 – Фрагмент модели резервуара с КЖ по Еврокоду.

значений для конкретных точек. Один из вариантов решения проблемы задания ветровой нагрузки, но для расчетного комплекса SCAD Soft 11.5, приведен в статье [11]. Суть метода состоит в задании нагрузки через текстовый файл, что позволяет значительно ускорить этот процесс. Полученные значения нагрузки определённым образом вводятся в структуру текстового файла модели резервуара. И хотя расчетные комплексы SCAD Soft 11.5 и ЛИРА-САПР 2015 R4 имеют определенные отличия, структура текстовых файлов однотипная. Таким образом, при проведении дальнейшего исследования реальная эпюра ветрового давления будет задаваться в соответствии с последовательностью, изложенной в работе [11], при определенных уточнениях.

4.1 Расчетные нагрузки по нормам РФ

Согласно п. 6.2 СП 20.13330.2011 [7] расчетное сочетание нагрузок с учетом коэффициентов сочетания будет выглядеть следующим образом:

$$1 \cdot \text{собственный вес} + 1 \cdot \text{ветер} + 0,9 \cdot \text{вакуум}.$$

При этом для каждой нагрузки имеются свои коэффициенты надёжности. Собственный вес принимается согласно типовому проекту с коэффициентом надёжности 1,05. Вакуум, величиной в 0,25 МПа, задается равномерно распределенной нагрузкой на кровлю, стенку и днище. Коэффициент надёжности для такой нагрузки принят равным 1,2.



Рисунок 4 – Ветровая нагрузка, сформированная в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4.

Ветровую нагрузку следует вычислять отдельно на каждый конечный элемент. В пределах границ КЭ ветровая нагрузка считалась постоянной. Для кровли и стенки расчетное значение ветровой нагрузки согласно [7] определяется по формуле (5). Коэффициент надёжности для ветровой нагрузки равен 1,4.

$$w = w_m + w_p, \quad (5)$$

где w_m – нормативное значение средней ветровой нагрузки,
 w_p – нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Затем по аналогичному принципу, изложенному в статье [11], была сформирована расчетная схема с ветровой нагрузкой. Одно из характерных сечений в уровне пятого пояса стенки резервуара приведено на рисунке 4.

4.2 Расчетные нагрузки по Еврокоду

Согласно [1] расчетное сочетание нагрузок с учетом частных коэффициентов, будет выглядеть следующим образом:

1*собственный вес + 0,6*ветер + 0,7*вакуум.

Для вакуума коэффициент надежности принимается равным 1,5 согласно таблице А.1.1 [1], а для собственного веса равным 1,35. Для постоянных воздействий, необходимо учитывать коэффициент $\zeta = 0,9$. Как отмечалось ранее, Еврокод предлагает два варианта вычисления ветровой нагрузки:

а) упрощенный вариант – сжимающая равномерно распределенная нагрузка на стенку резервуара;

б) усложненный вариант – это реальная эпюра ветрового давления. Для определения расчетных значений ветровой нагрузки необходимо вычислять ряд коэффициентов и промежуточных значений. При этом значения коэффициентов меняются как по высоте, так и по длине окружности.

Поскольку использование в расчётах реальной эпюры ветрового давления может позволить выявить негативные эффекты, а также, поскольку СП не предлагает задание упрощённой эпюры, будет использоваться реальная эпюра ветрового давления. К полученным значениям применяется коэффициент надежности для ветровой нагрузки, согласно п. 6.4.3.2 [1] равный 1,5.

5. РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА

Для сформированных расчетных моделей резервуаров с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 выполнен статический расчет на действие расчетных сочетаний нагрузок (п. 3) с определением возникающих напряжений и коэффициентов запаса устойчивости элементов для стенки резервуара.

5.1 Сравнение параметров напряженного состояния

Будет проведено сравнение возникающих кольцевых и меридиональных напряжений в следующих вариантах:

- напряжения в стенке резервуара с кольцами жесткости и без них (согласно Еврокоду);
- напряжения в стенке резервуара с кольцами жесткости и без них (согласно СП);

Поскольку рассматриваемые сочетания нагрузок являются определяющими при расчете на устойчивость, а не на прочность, рассматриваться будут только напряжения, «сжимающие» корпус резервуара.

5.1.1 Сравнение напряжений, согласно Еврокоду

Для смоделированных схем резервуаров в двух конструктивных вариантах (с КЖ и без: описание модели резервуара с КЖ по ЕН приведено в п. 4.2) были определены значения напряжений и для пиковых значений представлены графики изменения отрицательных меридиональных (рис. 5), кольцевых (рис. 6) напряжений.

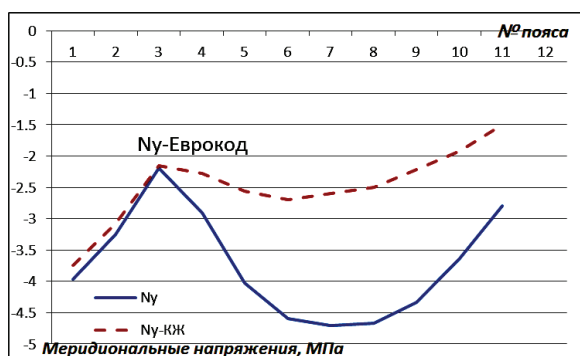


Рисунок 5 – Меридиональные напряжения.

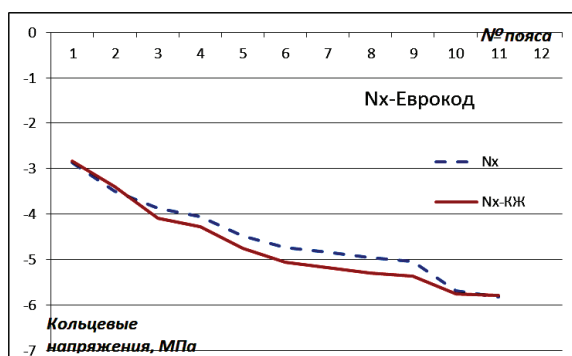


Рисунок 6 – Кольцевые напряжения.

5.1.2 Сравнение возникающих напряжений согласно нормам РФ

Описание модели резервуара с КЖ по СП приведено в п. 4.1. Для резервуара, смоделированного согласно СП [7], были также составлены графики возникающих кольцевых (рис. 7), меридиональных (рис. 8).

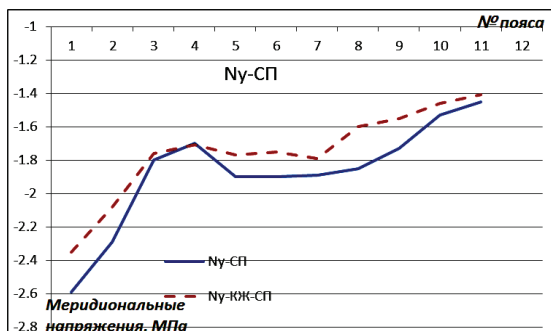


Рисунок 7 – Меридиональные напряжения.

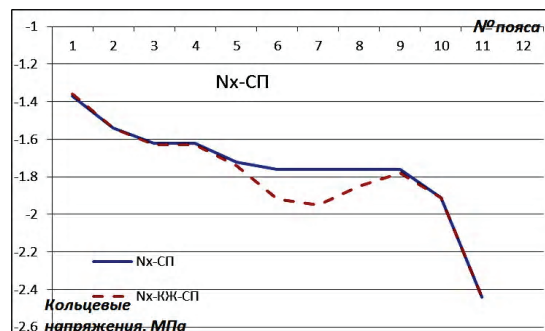


Рисунок 8 – Кольцевые напряжения.

5.1.3 Сравнение напряжений, возникающих от расчетного сочетания нагрузок по нормам Евросоюза и РФ

Также целью данного исследования является сравнения возникающих напряжений в стенке от реальной эпюры ветрового давления согласно норм Евросоюза и РФ. Поскольку, согласно выполненным расчетам, размещение КЖ на стенке резервуара и их жёсткость отличаются для каждого из рассматриваемых нормативных документов, было рассмотрено сравнение резервуаров без КЖ.

Как и в предыдущих пунктах был выполнен расчет и по его результатам составлены графики отрицательных осевых (рис. 9) и меридиональных (рис. 10) напряжений по поясам.

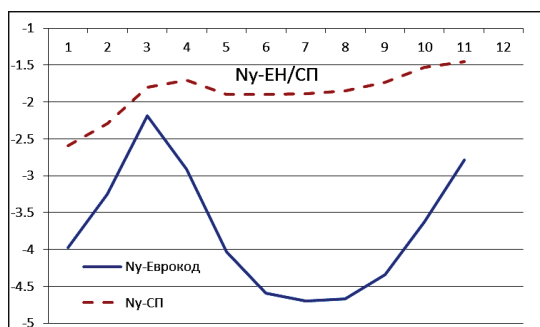


Рисунок 9 – Меридиональные напряжения.

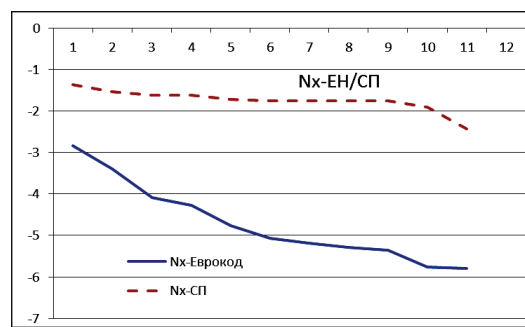


Рисунок 10 – Кольцевые напряжения.

5.2 Сравнение КЗУ, полученных при использовании различных норм проектирования

5.2.1 Определение аналитических значений КЗУ по нормам РФ

Расчёт на устойчивость стенки вертикального цилиндрического резервуара по СП выполняется согласно разделу 11.2.5 данного документа. Суть проверки на устойчивость состоит в сравнении возникающих напряжений с допустимыми (критическими) – формула 6:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{CR1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{CR2}} \leq \gamma_C = 1, \quad (6)$$

где σ_1, σ_2 – меридиональное напряжение и кольцевое действующие напряжения, определяются в программе ЛИРА-САПР 2015 R4;

$\sigma_{CR1}, \sigma_{CR2}$ – критическое меридиональное и кольцевое напряжения.

Аналитическое значение коэффициента запаса устойчивости для каждого пояса будет определяться как отношение единицы к полученному результату по формуле 6.

5.2.2 Определение аналитических значений КЗУ по Еврокоду

Расчёт на устойчивость стенки цилиндрического резервуара проводится согласно документу [3], который в свою очередь ссылается на нормативный документ [2]. В последнем документе в отличие от СП приведены различные методики расчёта, отличающиеся детальностью учитываемых факторов (нелинейность, начальные несовершенства) и соответственно сложностью реализации. В частности аналитический расчёт можно вести только с использованием методики проектирования по

напряжениям – формула 7. Следовательно, именно по указанной методике и будет выполняться расчёт на устойчивость.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1, \quad (7)$$

где $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ и $\tau_{x\theta,Ed}$ – расчетные значения сжимающих мембранных меридиональных, кольцевых и касательных напряжений в оболочке;

$\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$ и $\tau_{x\theta,Rd}$ – критические значения составляющих напряжений;
 k_x , k_θ , k_τ и k_i – параметры взаимодействия при продольном изгибе.

Расчетные значения напряжений, как и для расчёта по СП, будут определяться в программном комплексе ЛИРА-САПР 2014 R4. Методика расчёта остальных составляющих формулы 7 громоздкая и требует множество промежуточных вычислений, поэтому в данной статье приводиться не будет. На результат вычислений существенно влияет принятое качество изготовления. Поскольку будет производиться сравнение с численными значениями КЗУ, полученными с использованием трёхмерной модели с идеальной геометрией, качество изготовления было принято «наилучшим». КЗУ будет определяться как отношение к единице результата по формуле 7.

5.2.3 Определение численных значений КЗУ стенки в программе ЛИРА-САПР 2015 R4

Коэффициенты запаса по устойчивости определялись программными средствами комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 для всех рассматриваемых нагрузок и конструктивных вариантов. При этом, поскольку цель данного исследования работа стенки резервуара, то КЗУ полученные в других элементах конструкции резервуара, учитываться не будут. Возможность определения КЗУ для каждого конкретного элемента конструкции присутствует в программе. Рассматривалась только первая форма потери устойчивости. По полученным результатам была сформирована таблица 2.

Таблица 2 – Сравнение коэффициентов запаса устойчивости

№	Нормы проектирования	Конструктивный вариант	КЗУ стенки		Пояс первый теряющий устойчивость	
			Аналитика	МКЭ	Аналитика	МКЭ
1	Еврокод 1-6	Без КЖ	0,5	0,79	11	9
2		С КЖ (2 шт.)	1,6	2,39	11	7
3	СП	Без КЖ	0,52	1,26	11	9
4		С КЖ (1 шт.)	1,04	2,09	11	10

Как видно из таблицы 2, значения аналитических и численных значений КЗУ существенно отличаются. Причина таких отличий в запасах, которые дают нормы по сравнению с классическим решением. Так, согласно книге [9], кольцевые критические напряжения потери устойчивости для цилиндрической стенки при её шарнирном закреплении определяются по формуле (8):

$$\sigma_{cr,2} = 0,92E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5}. \quad (8)$$

При жёстком закреплении критическое напряжение по формуле 15 увеличивается ещё в 1,5 раза. Таким образом, приведенная в СП формула обеспечивает запас в 1,67...2,51 раза по сравнению с классическим решением. С учётом такой поправки для резервуара с кольцами жёсткости, КЗУ будет в пределах 0,83..1,25, что коррелирует с результатом, полученным аналитически – 1,04. Кроме того, отличия в КЗУ вызваны учётом в инженерных методиках возможных дефектов и несовершенств. Различия между аналитическими и численными значениями КЗУ по Еврокоду вызваны аналогичными причинами.

6. ВЫВОДЫ

6.1 Вывод о распределении напряжений в стенке резервуара

1. Для резервуара без колец жёсткости вид распределения меридиональных и кольцевых напряжений принципиально не отличается для рассматриваемых нормативных документов. При этом

напряжения по Еврокоду в стенке резервуара больше в 1,5–2,0 раза, чем по СП. Для рассматриваемого расчетного сочетания это вызвано в первую очередь значительным отличием частных и аэродинамических коэффициентов для ветровой нагрузки. Наибольшее отличие вносит коэффициент возрастания ветровой нагрузки по высоте.

2. Кольцевые напряжения при постановке колец жёсткости снижаются только в зонах их крепления. Пиковые значения напряжений в пределах каждого пояса незначительно снижаются по сравнению с неподкреплённой стенкой. Таким образом, устойчивость стенки повышается в первую очередь за счёт увеличения критических напряжений, а не снижения возникающих.

3. Меридиональные напряжения при постановке КЖ снижаются по всей высоте стенки резервуара, при этом эту особенность особенно видно при постановке двух КЖ по требованиям Еврокода. Снижение меридиональных напряжений связано с уменьшением амплитуды деформаций в кольцевом направлении.

6.2 Выводы по расчёту на устойчивость

1. Постановка даже одного кольца жёсткости существенно повышает устойчивость стенки. Однако полученное нормативное размещение КЖ может быть не оптимальным.

2. Значения КЗУ, полученные в программе ЛИРА-САПР 2014 R4, имеют большую величину, чем аналитические, и для Еврокода и для СП. Это вызвано запасами, заложенными в указанные нормативы. При учёте запаса заложенного в нормы, полученные значения коррелируют. Пропорциональность возрастания КЗУ для аналитического и численного расчётов при постановке КЖ, также соблюдается. Таким образом, полученную модель резервуара можно использовать для дальнейших исследований.

3. Следовательно, имеет смысл провести дальнейшие исследования с целью получения методики размещения КЖ с наиболее рациональным шагом, обеспечивающим максимальный КЗУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eurocode : Basis of structural design [Текст]. – Brussels : Management Centre, 2005. – 119 p. – (European Standard).
2. Eurocode 3: Design of steel structures [Текст] : Part 1–6: Strength and stability of shell structures. – Brussels : Management Centre, 2007. – 94 p. – (European Standard).
3. Eurocode 3: Design of steel structures [Текст] : Part 4–2. Tanks : EN 1993-4-2. – Brussels : Management Centre, 2007. – 55 p. – (European Standard).
4. Eurocode 1: Actions on structures [Текст] : Part 1–4: General actions – Wind actions : EN 1991-1-4. -Brussels : Management Centre, 2010. – 149 p. – (European Standard).
5. Eurocode 1: Actions on structures [Текст] : Part 1–1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings : EN 1991-1-1. – Brussels : Management Centre, 2002. – 47 p. – (European Standard).
6. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции [Текст]. – Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Введ. 2011-05-20 / Министерство регионального развития РФ. – М. : ОАО «ЦПП», 2011. – 172 с.
7. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия [Текст]. Актуализированная редакция взамен СНиП 2.01.07-85. – Введ. 2011-05-20 / ОАО «НИЦ "Строительство"». – М. : Минстрой России. – 2011. – 81 с.
8. Типовой проект 704-1-171.84 Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 куб. м [Текст] : Ал. 1. Конструкции металлические резервуара. – М. : ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1984. – 44 с.
9. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
10. Мущанов, В. Ф. Сравнительный анализ эффективности конструктивных и расчетных методов обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / В. Ф. Мущанов, М. Н. Цепляев // Металлические конструкции. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 123–137.
11. Цепляев, М. Н. Моделирование реальной эпюры ветрового давления на цилиндрический резервуар в среде SCAD [Текст] / М. Н. Цепляев // Металлические конструкции. – 2016. Т. 22. – № 4. – с. 183–192.
12. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Текст] : Серия 03. Выпуск 69. – М. : ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с. – ISBN 978-5-9687-0531-0.

Получено 13.04.2018

В. П. МУЩАНОВ, М. М. ЦЕПЛЯЄВ
АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНИХ І АНАЛІТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПАСУ
СТІЙКОСТІ СТІНКИ РЕЗЕРВУАРА
ДОНБУСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ»

Анотація. Вивчається зміна напруженого стану і коефіцієнта запасу стійкості стінки вертикального циліндричного резервуара при розміщенні горизонтальних кілець жорсткості за нормами Євросоюзу та Російської Федерації. Основним навантаженням є вітер з урахуванням реального розподілу потоку. Метою дослідження є отримання адекватної кінцево-елементної моделі для подальшого вивчення впливу кілець жорсткості на стійкість стінки резервуара. Аналітичні значення коефіцієнтів запасу стійкості визначаються за методиками, наведеними в нормативних документах Євросоюзу та РФ. Чисельні значення напружень, що виникають, і коефіцієнтів запасу стійкості визначаються методом скінченних елементів. Для цього використовується розрахунковий комплекс ЛІРА-САПР 2015 R4. В результаті було визначено вплив постановки кілець жорсткості на величину критичних і діючих напружень. Також визначені чисельні і аналітичні значення коефіцієнтів запасу стійкості при нормативному розміщенні кілець жорсткості.

Ключові слова: вертикальний циліндричний резервуар, вітрове навантаження, напруження, метод скінченних елементів, циліндрична оболонка, стійкість.

VOLODYMYR MUSHCHANOV, MAXIM TSEPLIAEV
ANALYSIS OF NUMERICAL AND ANALYTICAL VALUES OF THE TANK WALL
STABILITY FACTOR
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The change in the stress state and the wall stability coefficient of the vertical cylindrical tank shell is studied when horizontal stiffening rings are placed according to the norms of the European Union and the Russian Federation. The main load is wind, taking into account the real flow distribution. The aim of the study is to obtain an adequate finite element model for further study of the influence of the stiffening rings on the stability of the reservoir wall. Analytical values of the safety factor of stability are determined by the methods given in the normative documents of the European Union and the Russian Federation. Numerical values of the resulting stresses and stability factors are determined by the finite element method. For this purpose, the LIRA-CAD 2015 R4 computational complex is used. As a result, the effect of using the stiffening rings on the magnitude of the critical and acting stresses was determined. Also, the numerical and analytical values of the stability factors for the stability of the stiffening rings are determined.

Key words: vertical cylindrical tank, wind load, stress, finite element method, the cylindrical shell, stability.

Мушанов 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 – аспирант кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: изучение влияния локальных напряжений на прочность и устойчивость вертикальных цилиндрических резервуаров.

Мушанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи ДОНБУСЬКА 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.

Цепляев Максим Миколайович – аспірант кафедри теоретичної і прикладної механіки ДОНБУСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ». Наукові інтереси: вивчення впливу локальних напружень на міцність і стійкість вертикальних циліндричних резервуарів.

Mushchanov Volodymyr – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Vice-rector on the scientific activity of 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: the reliability theory, analyze, designing and engineering diagnostics of spatial metallic structures.

Tsepliaev Maxim – Post-graduate student, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: influence of local stresses on the strength and stability of vertical cylindrical tanks.