



(17)-0365-1

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ И РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

**В. Ф. Мущанов, М. Н. Цепляев**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.  
E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru

Получена 06 сентября 2017; принята 22 сентября 2017.

**Анотация.** В данной статье рассмотрены нормативные документы США, Европы и некоторых стран СНГ на предмет сравнения методик расчета и проектирования вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Необходимость такого анализа вызвана распространенными случаями локальной потери устойчивости на цилиндрических стенках резервуаров. Помимо сравнения методик расчета и конструктивных требований, в статье приведены результаты аналитических расчетов на устойчивость стенки резервуара в двух конструктивных вариантах: с кольцами жесткости и без них. По результатам аналитических расчетов были определены запасы по устойчивости, которые дают различные нормы. Кроме того, для каждого анализируемого документа приведены неучтенные факторы, которые могут приводить к потере устойчивости стенки. Сделаны выводы о направлении дальнейших исследований.

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

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКТИВНИХ І РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СТІНОК ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

**В. П. Мущанов, М. М. Цепляев**

ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.  
E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru

Отримана 06 вересня 2017; прийнята 22 вересня 2017.

**Анотація.** У даній статті розглянуті нормативні документи США, Європи і деяких країн СНД на предмет порівняння методик розрахунку і проектування вертикальних циліндричних резервуарів для нафти і нафтопродуктів. Необхідність такого аналізу викликана поширеними випадками локальної втрати стійкості на циліндричних стінках резервуарів. Крім порівняння методик розрахунку і конструктивних вимог, у статті наведені результати аналітичних розрахунків на стійкість стінки резервуара в двох конструктивних варіантах: з кільцями жорсткості і без них. За результатами аналітичних розрахунків були визначені запаси щодо стійкості, які дають різні норми. Крім того, для кожного аналізованого документа наведені невраховані фактори, які можуть призводити до втрати стійкості стінки. Зроблено висновки про напрям подальших досліджень.

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

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF CONSTRUCTIVE AND DESIGN METHODS FOR ENSURING THE STABILITY OF THE WALLS OF VERTICAL CYLINDRICAL TANKS

Volodymyr Mushchanov, Maxim Tcepliaev

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,*

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

*E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru*

*Received 06 September 2017; accepted 22 September 2017.*

**Abstract.** This article considers the normative documents of the USA, Europe and some CIS countries for comparison of calculation and design methods of vertical cylindrical tanks for oil and oil products. The need for such an analysis is caused by the widespread cases of local instability on the cylindrical walls of tanks. In addition to compare the calculation methods and design requirements, the article presents the results of analytical calculations for the stability of the reservoir wall in two design versions: with and without rings. According to the results of analytical calculations, stability stocks were determined, which give different norms. In addition, for each analyzed document unaccounted factors, which can lead to the loss of stability of the wall, are given. This gives us a direction for future research.

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

### Введение

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары являются одним из основных видов сооружений для хранения нефти и нефтепродуктов, опыт применения конструкций насчитывает более 100 лет. Несмотря на многолетний опыт использования таких конструкций и их однотипность, в нормативных документах разных стран методики по расчету и проектированию резервуаров существенно разнятся. При этом отличия касаются как требований по расчету, так и конструктивных особенностей резервуаров. И хотя во всех нормах к резервуарам предъявляются жесткие требования по обеспечению надежности. В реальных конструкциях часто наблюдаются эффекты местной потери устойчивости стенки и другие дефекты, возникающие в процессе эксплуатации. Следовательно, существует необходимость выполнить сравнение широко распространенных нормативных документов на предмет эффективности конструктивных и расчетных методов обеспечения устойчивости стенки резервуаров.

### 1. Обзор вопроса

#### *1.1 Обоснование актуальности совершенствования методик расчета ВЦР*

На сегодняшний день, несмотря на все возрастающую тенденцию использования альтернативных источников энергии, потребность в нефти и нефтепродуктах будет возрастать еще, как минимум, 20 лет.

Следует отметить, что для хранения нефти и нефтепродуктов чаще всего используются вертикальные цилиндрические резервуары большого объема от 10 000 до 100 000 м<sup>3</sup>. Таким сооружениям в нормативных документах разных стран присвоен наивысший класс опасности, поскольку при разливе хранящегося продукта, помимо очевидного ущерба, наносится серьезный вред экологии. Также с повышением надежности таких конструкций растет их применение для хранения технологических жидкостей и воды на химических и других предприятиях. При этом до сих пор существует ряд проблем, возникающих в процессе эксплуатации резервуара, требующих решения на этапе проектирования. В

частности такой проблемой являются эффекты местной потери устойчивости элементами стенки резервуара, которые могут привести к общей потере устойчивости конструктива и последующему разрушению конструкции. Также для стран СНГ, где парк эксплуатируемых металлических конструкций имеет существенный физический износ, актуальной проблемой является обеспечение надежности резервуаров, запроектированных 20–30 лет назад и эксплуатирующихся до сих пор.

### 1.2 Постановка проблемы

Хотя все нормативные документы предусматривают расчет на устойчивость, в реальных конструкциях часто можно наблюдать дефекты, аналогичные изображенному на рисунке 1.

Для предотвращения подобных ситуаций существует два наиболее распространённых конструктивных решения: это либо увеличение толщины стенки, либо постановка колец жесткости (далее КЖ). При этом, в случае использования колец жесткости конструкция становится более экономичной, однако появляется ряд дополнительных технологических процессов, связанных с их изготовлением и монтажом. Поэтому основной целью данной статьи будет критический анализ наиболее употребляемых методик расчета стенок резервуаров на устойчивость (с кольцами жёсткости и без) и определение задач дальнейших исследований в этом направлении.

В статье будут рассмотрены нормативные документы стран Европейского союза, некоторых стран СНГ и США.



**Рисунок 1.** Потеря устойчивости верхних поясов стенки резервуара.

## 2. Анализ нормативных документов

Для удобства сравнения примем общую схему анализа каждого нормативного документа:

- 1) краткая характеристика расчета на устойчивость стенки резервуара без колец жесткости (КЖ);
- 2) описание методики обеспечения устойчивости постановкой КЖ и требования к расположению КЖ;
- 3) требования к конструктиву КЖ.

### 2.1 Еврокод

Система Еврокодов имеет сложную взаимосвязанную структуру, однако основными нормативными документами, которые регламентируют расчет на устойчивость стенок вертикальных цилиндрических резервуаров, являются EN 1993-1-6 [1] и EN 1993-4-2 [2].

В общем Еврокод предлагает два подхода решения описываемой задачи при проектировании:

- 1) использование компьютерных программ для создания конечно-элементной модели, в которой будут учтены все конструктивные элементы, включая отверстия, навесные детали и прочее.
- 2) использование упрощенного аналитического расчета, на который накладываются некоторые ограничения по конструктиву и допустимые нагрузки.

#### 2.1.1 Описание расчета на устойчивость по Еврокоду – стенка без КЖ

Для расчета устойчивости полученные значения напряжений (МКЭ либо аналитически) сравниваются с допустимыми, и делается вывод об устойчивости конструкции. Основное условие, формулируемое в EN 1993-1-6 [1] имеет следующий вид:

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

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;

$k_x$ ,  $k_\theta$ ,  $k_\tau$  и  $k_t$  – параметры взаимодействия при продольном изгибе.

Учитывая, что в приведенной выше формуле в опосредствованном виде учитывается качество сборки и монтажа, допуск некруглости, а также вмятины, то в целом учет геометрических несовершенств при расчете на устойчивость неподкрепленной оболочки достаточно детальный и охватывает основной спектр возможных ситуаций. Параметры допустимых дефектов ограничены, при соблюдении конкретных ограничений возможно назначить класс изготовления, согласно которому можно определить предельно допустимые значения напряжений. Однако остается открытым вопрос влияния величины, ориентации, параметров дефекта на результирующее напряженно-деформированное состояние и рациональные методы их учета на стадии проектирования. К тому же методика определения критических напряжений по Еврокоду довольно громоздкая, что затрудняет понимание того, какие именно и в каком сочетании учтены возможные дефекты конструкции для каждого класса изготовления.

### 2.1.2 Описание расчета на устойчивость по Еврокоду – стенка с КЖ

В EN 1993-1-6 [1] оговаривается возможность усиления оболочки кольцами жесткости, однако аналитических выражений для вычисления предельных напряжений потери устойчивости не приводится. Устойчивость подкрепленных оболочек в [1] предлагается оценивать по EN 1993-4-2 [2]. Указания по обеспечению устойчивости стенки путем постановки колец жесткости приводятся в разделе 11 [2].

Суть методики состоит в определении допустимой высоты стенки, в пределах которой нет необходимости устанавливать кольца жесткости  $H_p$  (формула 2), эквивалентной высоте стенки  $H_E$  (формула 3).

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

$$H_E = \sum h \left( \frac{t_{min}}{t} \right)^{2,5}, \quad (3)$$

где  $t_{smin}$  – номинальная толщина самого тонкого пояса;

$t$  – толщина расчетного пояса;

$h$  – высота пояса;

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

$K$  – коэффициент, учитывающий ветровое давление;

$r$  – радиус оболочки.

При наличии осевого давления формулы 2 и 3 можно использовать, если только  $r/t > 200$  и выполняется условие (формула 4):

$$f_y \geq 1,15E \left( \frac{r}{l} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{1,5}, \quad (4)$$

где  $f_y$  – нормативный предел текучести;

$l$  – высота редуцированной стенки, либо расстояние между КЖ;

$t$  – толщина каждого пояса последовательно.

В [2] присутствует требование соблюдения допусков, указанных в [1], однако в приведенной методике по расчету на устойчивость нет указаний по учету класса изготовления. Соответственно нет четкого понимания, каким образом учесть влияние установки колец жесткости на устойчивость стенки при учете величины, ориентации, параметров возможных дефектов, в том числе выходящих за параметры нормируемых допусков.

Особое внимание в ходе уточненной оценки устойчивости стенки должно уделяться корректному приложению ветровой нагрузки, а также проблемам нормирования основного сочетания нагрузок при расчете на устойчивость: от действия ветра, вакуума и осевого давления от покрытия и снега. В [1] и [2] предлагается задавать ветер в двух возможных вариантах – реальная эпора ветрового давления (рисунок 2а) и приведенная (рисунок 2б) (равномерное сжатие по кольцу). Первый вариант ориентирован на моделирование при помощи расчетных комплексов, второй вариант в большей степени ориентирован на использование аналитических методов.

Для получения точной картины работы конструкции следует воспользоваться реальной эпорой ветрового давления, значения такой нагрузки определяется по [3]. Распределение ветрового давления для резервуара описано достаточно подробно, однако, как правило, резервуа-

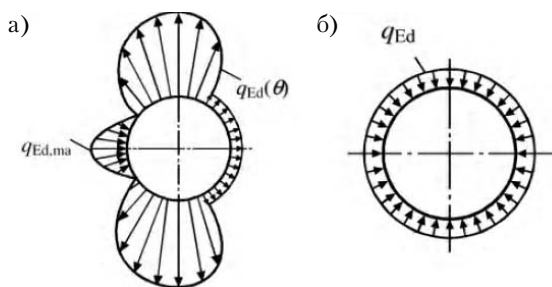


Рисунок 2. а) реальная эпюра ветрового давления; б) упрощенная эпюра ветрового давления.

ры расположены в группе. Указанный нормативный документ не предлагает методики учета распределения ветрового потока для резервуаров, находящихся в группе, хотя это отличие может довольно существенно отражаться на НДС стенки резервуара.

Таким образом, при проектировании по Еврокоду расчет резервуаров без КЖ учитывает возможные геометрические несовершенства, однако не рассматривается взаимное влияние различных видов дефектов, что зачастую имеет место в практике эксплуатации. При использовании КЖ аналитические выражения приведены в упрощенном виде и не учитывают возможных геометрических несовершенств (учитывают в запас). При этом и в обоих случаях не делается различия между расчетом резервуара, отдельно стоящего и состоящего в группе. Поскольку методики расчета резервуара с КЖ и без них в Еврокоде проработаны не равнозначно, то для резервуара с КЖ принимаются завышенные коэффициенты надежности, что отражается на экономичности конструкции и оценке целесообразности постановки КЖ.

### 2.1.3 Требования к конструктиву КЖ

Требования к форме поперечного сечения и крепления КЖ в Еврокоде отсутствуют. В разделе 11 [2] приводится формула для определения минимально необходимого момента инерции кольца жесткости из условия действия максимально возможного отрицательного давления.

## 2.2 Нормы РФ

На сегодняшний день в РФ наряду с обязательными к выполнению Сводами Правил дейст-

ют множество стандартов по проектированию, устройству и эксплуатации резервуаров, которые носят рекомендательный характер. Некоторые из них выпущены крупными частными компаниями для собственных нужд. Основными такими документами являются: Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1 000–50 000 м<sup>3</sup> [9]; СТО–СА–03–002–2009 [11]; ПБ 03-605-03 [18]. В 2013 году ассоциацией «Ростехэкспертиза» был издан документ под названием «Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов – Серия 03» [10], который (по основным позициям) включил в себя вышеперечисленные нормативные документы. Поэтому в данной статье будут проанализированы два нормативных документа РФ: обязательный к соблюдению СП 16.13330.2010 [12] и носящий рекомендательный характер документ [10].

### 2.2.1 ВЦР без КЖ

Согласно СП [12] расчет на устойчивость замкнутых цилиндрических оболочек вращения, подверженных осевому и кольцевому давлению, производится по формуле 5:

$$(\sigma_1 / \sigma_{cr,1} + \sigma_2 / \sigma_{cr,2}) / \gamma_c \leq 1, \quad (5)$$

где  $\sigma_1$  – осевые действующие напряжения;  
 $\sigma_{cr,1}$  – осевые критические напряжения;  
 $\sigma_2$  – меридиональные действующие напряжения;  
 $\sigma_{cr,2}$  – меридиональные критические напряжения;  
 $\gamma_c = 1$  – коэффициент условий работы.

Значения критического меридионального и кольцевого напряжений определяются в зависимости от отношения толщины оболочки к радиусу. При этом указаний по учету возможных геометрических отклонений, качества сборки и допуска на коррозию не приводится, хотя опосредствованно этот учет осуществляется с помощью соответствующих значений коэффициентов, используемых при определении величин критических напряжений.

В [10] устойчивость стенки предлагается проверять по формуле аналогичной приведенной в СП (формула 2). Учет возможных дефектов приводится в виде таблицы с допустимыми параметрами вмятин, хлопунгов и других дефектов,

без превышения которых можно использовать приведенную методику расчета на устойчивость. Каким образом поступать при превышении указанных величин в нормах (а это зачастую встречается в практике обследования) и меняются ли возможные пределы допусков при наличии КЖ, не оговаривается.

Значения меридиональных критических напряжений также вычисляются по одинаковым формулам. Критические кольцевые напряжения по [10] определяются по формуле 6:

$$\sigma_{cr,2} = 0,55 \frac{r}{H_r} \frac{E}{\sqrt{\delta^3}}. \quad (6)$$

В формуле 6 в качестве расчетной высоты стенки, используется редуцированная высота стенки  $H_r$ , определяемая по формуле 7 и величина  $\delta$  по формуле 8:

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_i \left( \frac{t_{mr}}{t_{ir}} \right)^{2,5}, \quad (7)$$

$$\delta = \frac{r}{t_{mr}}, \quad (8)$$

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.

В СП [12] критические кольцевые напряжения определяются по одной из двух формул в зависимости от отношения высоты оболочки к радиусу, для основных габаритов резервуаров расчетной будет формула 9:

$$\sigma_{cr,2} = 0,55 E (r/l) (t/r)^{3/2}, \quad (9)$$

где  $l$  – высота стенки резервуара;

$t$  – толщина стенки;

$r$  – радиус оболочки.

В формуле 9 указаний по приведению длины оболочки разной толщины к расчетной в отличие от [10] не приводится.

### 2.2.2 Стенка с КЖ

В обоих нормативных документах рассматривается возможность установки колец жесткости для обеспечения устойчивости стенки как альтернатива увеличению толщины стенки. Метод учета колец жесткости схожий и заключается в модифицировании формул 6 и 9 соответствен-

но для каждого нормативного документа. Так в формуле 9 вместо длины оболочки  $l$  должно быть подставлено расстояние между кольцами жесткости  $s$ . При этом требования к расположению колец жесткости и их количеству не приводятся, однако есть примечание, вызывающее вопрос применимости данного метода. В п. 11.2.4 [12] указано, что шаг, с которым располагаются КЖ, должен быть не менее  $s > 0,5r$  и для большинства резервуаров объемом более 20 000 м<sup>3</sup> данное требование невыполнимо, так как радиус резервуара больше высоты в 1,5 и более раз.

В РБ [10] ограничение по шагу колец жесткости  $s > 0,5r$  в отличие от [12] не приводится. Однако присутствуют более развернутые рекомендации к расположению колец. Место установки промежуточного кольца рекомендуется выбирать с учетом обеспечения равенства значений  $H_r$  (формула 7) для участков стенки ниже и выше кольца, и оно должно быть не ближе 150 мм от горизонтального сварного шва во избежание влияния сварочных напряжений.

Как отмечалось ранее, наличие КЖ влияет на значение критических кольцевых напряжений. Учет производится уточнением формулы 7: при наличии ребра жесткости в пределах  $i$ -го пояса в качестве  $h_i$  берется расстояние от кромки этого пояса до ребра жесткости. В результате расчетная высота стенки снижается.

При нормировании ветровой нагрузки по [10] последнее ссылается на СП «Нагрузки...» [17] и предлагает в качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу п. 3.5.8.5 [10]. В [12] указаний по приведению ветровой эпюры к упрощенной не приводится.

### 2.2.3 Требования к конструктиву КЖ

Согласно п. 11.2.4 [12] должно быть обеспечено условие устойчивости КЖ в своей плоскости. Расчетная длина стержня должна приниматься  $l_{ef} = 1,8r$ , 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 не приводится.

В [10] размещению и расчету КЖ посвящен раздел 3.6. Согласно этому разделу КЖ рекомендуется иметь неразрезное сечение по всему пе-

риметру стенки, а также для КЖ, ширина которых в 16 раз и более превышает толщину горизонтального элемента кольца, предусматриваются опоры, выполняемые в виде ребер или подкосов. При этом расстояние между опорами не более чем в 20 больше, чем высота внешней вертикальной полки кольца. Момент сопротивления КЖ должен быть не менее (формула 10):

$$W_{zi} = \frac{1,4p_{w0} + 1,2p_v}{215R} D^2 H_{r\max}, \quad (10)$$

где  $H_{r\max}$  – максимальное из значений редуцированной высоты участка стенки выше или ниже промежуточного кольца;

$p_v$  – нормативное значение вакуума;

$p_{w0}$  – нормативное ветровое давление;

$D$  – диаметр резервуара;

$R$  – расчетное сопротивление.

Также в момент сопротивления КЖ включаются части стенки толщиной  $t$  шириной  $L$ , определяемой по формуле из п. 3.6.10.5 [10].

### 2.3. Нормы США – API 650

Нормативный документ [8] является основным по проектированию резервуаров в США. В предисловии данного документа указано, что Правила проектирования, указанные в настоящем Стандарте, представляют собой минимальные требования. Более строгие правила проектирования, указанные Покупателем или выпущенные Изготовителем, принимаются путем взаимного согласования между Покупателем и Изготовителем. Пользователи данных Стандартов обязаны не полагаться исключительно на информацию, представленную в настоящем документе. Они должны использовать информацию, содержащуюся в деловых, научных, инженерных стандартах и решениях в области безопасности.

#### 2.3.1 Краткое описание расчета на устойчивость по API 650

Методика расчета несколько отличается от Еврокода и норм РФ. В API 650 предлагается выполнить расчет на прочность стенки и затем, используя приведенные формулы, определить высоту стенки, не требующую подкрепления. То есть для получения конструкции без КЖ следует увеличивать толщины стенки до тех пор, пока высота стенки, не требующая подкрепления, бу-

дет равна или больше редуцированной высоты стенки.

При отсутствии вакуума максимальная высота неукрепленной оболочки вычисляется согласно п. 5.9.7 [8] по формуле 11:

$$H_l = 9,47t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 \left(\frac{190}{V}\right)^2}, \quad (11)$$

где  $t$  – номинальная толщина самой тонкой части оболочки;

$D$  – номинальный диаметр оболочки;

$V$  – расчетная скорость ветра.

В документе указано, что для одинаковой устойчивости выше и ниже промежуточного ветрового кольца, оно должно располагаться посередине редуцированной высоты стенки  $H_{ts}$ . Если половина редуцированной высоты корпуса превышает максимальную высоту  $H_1$ , то следует использовать второе ветровое кольцо для уменьшения высоты неподкрепленной оболочки до высоты менее максимальной.

При наличии вакуума расчет стенки резервуара на устойчивость следует вести по приложению V [8]. В указанном приложении приведен расчет для корпуса без элементов жесткости и с ними. В обоих случаях предварительно необходимо подобрать толщины поясов из условия прочности и затем вычислить редуцированную (трансформированную) высоту стенки резервуара  $H_{ts}$ . Далее алгоритм несколько отличается.

В случае проектирования резервуара без КЖ требуется обеспечить следующие условия (формулы 12, 13):

$$p_e \leq \frac{E}{15203\psi \left(\frac{H_{TS}}{D}\right) \left(\frac{D}{t_{s\min}}\right)^{2,5}} \quad (12)$$

либо

$$t_{s\min} \geq \frac{47,07(\psi H_{TS} P_s)^{0,4} D^{0,6}}{(E)^{0,4}}, \quad (13)$$

где  $H_{TS}$  – трансформированная высота стенки резервуара, м;

$D$  – диаметр резервуара, м;

$\psi$  – коэффициент сочетания нагрузок;

$P_s$  – суммарное расчетное давление ветра и вакуума, КПа;

$t_{s\min}$  – номинальная толщина самого тонкого пояса, мм.

При этом в данных уравнениях учитывается переменный коэффициент устойчивости,  $\psi$ , который зависит от величины вакуумного давления, а также коэффициент «слома» 0,8 для учета несовершенства геометрии цилиндра. Однако, какие именно несовершенства учитывает данный коэффициент и с какими параметрами, не уточняется.

Для случая подкрепленной стенки резервуара устойчивость определяется согласно указаниям пункта V.8.2 [8]. Как и для резервуара без КЖ определяются толщины поясов из расчета на прочность и вычисляется трансформированная высота стенки. Далее по формуле 14 вычисляется максимальная допустимая высота неусиленного корпуса и определяется требуемое количество ребер:

$$H_{safe} = \frac{(t_{smin})^{2,5} E}{15203D^{1,5} P_s \psi}, \quad (14)$$

где  $P_s$  – конечное расчетное внешнее давление для корпуса;

$\psi$  – коэффициент устойчивости, который зависит от величины вакуумного давления.

Что касается расчетных вариантов приложения ветровой нагрузки, в п. 5.9.7.1 [8] указывается, что по теоретическому режиму потери устойчивости ветровая нагрузка является равномерной, следовательно, отсутствует необходимость учета аэродинамического коэффициента. Остается открытым вопрос, учитывают ли в данном случае возможность повышенных значений ветровой нагрузки при распределении ветрового потока в группе резервуаров.

### 2.3.2 Требования к конструкции КЖ по API 650

Следует отметить, что в рассматриваемом нормативном документе указания по конструктиву КЖ приводятся более подробно, чем в Еврокоде и нормах РФ. Также приводится несколько принципиально возможных форм поперечного сечения КЖ (рисунок 3) и возможность использования ферм жесткости.

Момент инерции и площадь кольца должны быть не менее определенных, соответственно по формулам 15 и 16.

$$I_{reqd} = \frac{37,5QD^3}{E(N^2 - 1)}, \quad (15)$$

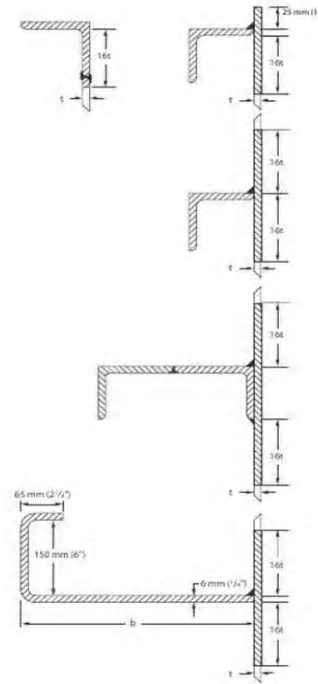


Рисунок 3. Варианты поперечного сечения КЖ по API 650.

где  $Q$  – радиальная нагрузка, действующая на промежуточные усиления со стороны корпуса;

$N$  – количество волн выпучивания корпуса под внешним давлением.

$$A_{reqd} = \frac{QD}{2f_s}, \quad (16)$$

где  $f_s$  – меньшее из допустимых напряжений растяжения материала.

Подкрепляющих ребер для КЖ не требуется, если ширина выступающей части в радиальной вертикальной плоскости не превышает ее толщину в 16 раз.

### 2.4 Нормы Украины

На сегодняшний день проектирование и расчет резервуаров регламентируют два документа это ДБН [14] и ВБН [7]. Разделы, которые касаются изготовления и монтажа резервуаров, в ВБН [7] заменены отдельным нормативным документом [14]. При этом по части листовых конструкций [13] полностью аналогичен СП [12], так как оба документа основываются на нормативных доку-



менгах СССР. Также на территории Украины действуют гармонизированные Еврокоды, текст которых полностью аналогичен оригинальным Еврокодам. Анализ СП [12] приведен в п. 2.2 данной статьи, а Еврокодов в п. 2.1, поэтому в данном пункте будет рассмотрен только ВБН [7].

#### 2.4.1 Краткое описание расчета на устойчивость по ВБН

В рассматриваемом нормативном документе нет четкого разделения в расчете резервуаров с КЖ и без них, поэтому ниже будет рассмотрена методика расчета на устойчивость в целом.

Согласно п. 3.39 [7] устойчивость стенки резервуара должна определяться по формуле 17:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq \gamma_c, \quad (17)$$

где  $\sigma_1, \sigma_{cr1}, \sigma_2, \sigma_{cr2}, \gamma_c$  – те же, что и в формуле 5. Ветровую нагрузку, согласно п. 3.33 [7], следует принимать равномерным по кругу по формуле 18:

$$W = 0,5 W_0 K C_{e1} \gamma_f, \quad (18)$$

где  $W_0$  – нормативное значение ветрового давления;

$K$  – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте;

$C_{e1}$  – аэродинамический коэффициент;

$\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке.

Значения критических напряжений должны определяться по ДБН [13], в которых есть ограничения по размещению колец жесткости на стенке резервуара. Подробнее вопрос вычисления критических напряжений рассматривается в п. 2.2.1 данной статьи.

Размещаться кольца жесткости должны на расстоянии не более чем 150 мм от сварных швов и не ниже чем 600 мм от низа стенки.

Указаний по учету возможных локальных деформаций на стенке резервуара не приводится.

#### 2.4.2 Требования к конструктиву КЖ по ВБН

Дополнительных требований, к изложенным в ДБН [13], которые касаются жесткости колец не приводится, указано лишь, что если ширина кольца превышает 16 толщин горизонтального элемента кольца, то требуется устанавливать ребра либо подкосы, расстояния между которыми

не должно превышать 20 высот внешней вертикальной полки кольца.

### 2.5 Сравнительные таблицы

Ниже приведена сравнительная таблица 1, в которую сведены основные моменты по расчету стенки резервуара на устойчивость по рассматриваемым нормативным документам.

Далее по каждому нормативному документу был выполнен расчет на устойчивость аналитическими методами для двух конструктивных вариантов ВЦР. Для первого варианта был выбран резервуар, с параметрами согласно типовому проекту [15], для второго варианта был принят аналогичный резервуар, но с добавлением в его конструкцию кольцевого ребра жесткости, которое расположено точно по середине высоты стенки. Перед выполнением расчетов были определены расчетные нагрузки с учетом соответствующих коэффициентов надежности. Расчетным сочетанием нагрузок было принято следующее: Собственный вес + Ветер + Вакуум + Снег, с учетом коэффициентов сочетания нагрузок для каждого нормативного документа. В результате были сформированы таблицы 2 и 3, в которых приведены проверки на устойчивость с учетом совместного действия меридиональных и кольцевых напряжений. Также в таблице приведены отличия по обеспечению запаса устойчивости по каждому нормативному документу, в процентах («+» недогруз, «-» перегруз). Ветровая нагрузка в расчетах на устойчивость по [12] принимается согласно рекомендациям Еврокода [2]. Для расчета на устойчивость согласно API [8] ветровую нагрузку допустимо определять по национальным нормам, в данном случае значения ветровой нагрузки принимались согласно ВБН [7]. Также в API отсутствует формула для учета совместного действия осевого и кольцевого давления, следовательно, проверка запаса устойчивости будет проводиться для каждого условия отдельно.

### 3. Выводы

Проанализировав данные, сведенные в таблицы 1–3, можно отметить несколько особенностей:

1. Из всех рассмотренных нормативных документов, учет геометрических несовершенств и дефектов есть только в Еврокоде и API. При

Таблица 1. Сравнение методик расчета на устойчивость

Страны	Документ	Проверка устойчивости стенки резервуара без КЖ	Проверка устойчивости стенки резервуара с КЖ	Требования к размещению КЖ	Требования к конструкции КЖ	Учет геометрических несовершенств и дефектов	Методика учета реальной эяюры ветровой нагрузки для резервуаров в группе
Евросоюз	EN 1993-1-6 [1]		Ссылается на EN 1993-4-2	нет	нет	Частично реализован	Есть только для одиночного резервуара
	EN 1993-4-2 [2]	Формула 1. Позволяет учесть все возникающие напряжения	Определение допустимой высоты стенки, в пределах которой нет необходимости устанавливать КЖ, а также обеспечение условия (формула 2)	Равные промежутки между КЖ по высоте редуцированной стенки	Конструктивных нет. Есть требования к минимальному моменту инерции	Приведены параметры предельно допустимых отклонений	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу
РФ	СП 16.13330.2010 [12]	Формула 2. Учитывает кольцевые и меридиональные напряжения	Реализуется подстановкой расстояния между КЖ в формулу 5, для определения критических напряжений	КЖ должны располагаться с шагом $l \geq 0,5r$	Конструктивных нет. Условная гибкость КЖ, с расчетной длиной $l_{ef} = 1,8r$ , не более 6,5	Не оговорен	Прямых указаний, в каком виде следует задавать ветровую нагрузку, нет
	РБ [10]	Аналогично СП 16.13330.2010	Снижение расчетной высоты при размещении КЖ	Обеспечение равенства значений $H_1$ выше и ниже кольца.	Неразрезное сечение. Если ширина больше 16 толщин КЖ, устанавливаются опоры. Приведена формула минимального момента инерции	Приведены параметры предельно допустимых отклонений	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу
США	API 650 [8]	Формула 8. Учитывает только кольцевые напряжения	Вычисляется максимальная допустимая высота корпуса без усиления и определяется требуемое количество ребер	КЖ следует располагать с равным шагом по высоте редуцированной стенки	Если ширина больше 16 толщин КЖ, устанавливаются опоры. Приведена формула минимального момента инерции и площади поперечного сечения КЖ	Введен «понижающий» коэффициент	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу
	ДБН МК [13]	Аналогично СП 16.13330.2010 [12]	Аналогично СП 16.13330.2010 [12]	Аналогично СП 16.13330.2010 [12]	Аналогично СП 16.13330.2010 [12]	Не оговорен	Аналогично СП 16.13330.2010 [12]
Украина	ВБН [7]	Формула 12. Учитывает кольцевые и меридиональные напряжения	Ссылается на ДБН [13]	Ссылается на ДБН [13] и не ближе 150 мм к швам поясов	Ссылается на ДБН МК [13]	Приведены параметры предельно допустимых отклонений	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу

Таблица 2. Сравнительная оценка устойчивости стенки резервуара  $V=20\,000\text{ м}^3$  ( $H_{cr} = 18\text{ м}$ ) на основе рассмотренных норм без КЖ

№ пояса	$t_n$	ЕН			СП			ВБН			АР1				
		$\frac{\sigma_M}{\sigma_{M,кр}}$	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{K,кр}}$	$\Delta, \%$	$\frac{\sigma_M}{\sigma_{M,кр}}$	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{K,кр}}$	$\Delta, \%$	$\frac{\sigma_M}{\sigma_{M,кр}}$	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{K,кр}}$	$\Sigma$	$\Delta, \%$	Условие 1	$\Delta, \%$	Условие 2	$\Delta, \%$
1	16	0,18	0,61	0,79	0,20	0,26	0,46	0,21	0,18	0,39	61	0,19	81	0,67	33
2	13	0,28	0,61	0,90	0,31	0,44	0,75	0,31	0,30	0,61	39	0,19	81	0,82	18
3	12	0,33	0,61	0,94	0,35	0,54	0,90	0,35	0,37	0,72	28	0,19	81	0,89	11
4	12	0,32	0,62	0,94	0,34	0,54	0,88	0,34	0,38	0,72	28	0,19	81	0,90	10
5	12	0,30	0,66	0,96	0,33	0,54	0,87	0,32	0,40	0,72	28	0,19	81	0,91	9
6	11	0,36	0,72	1,08	0,38	0,67	1,05	0,38	0,51	0,89	11	0,22	78	1,03	-3
7	11	0,34	0,76	1,10	0,36	0,67	1,04	0,36	0,53	0,89	11	0,22	78	1,05	-5
8	11	0,33	0,78	1,11	0,35	0,67	1,02	0,34	0,54	0,88	12	0,22	78	1,06	-6
9	11	0,31	0,80	1,11	0,33	0,67	1,01	0,33	0,55	0,88	12	0,22	78	1,07	-7
10	11	0,29	0,82	1,11	0,32	0,67	0,99	0,31	0,57	0,88	12	0,22	78	1,08	-8
11	10	0,35	0,86	1,21	0,37	0,86	1,23	0,36	0,74	1,10	-10	0,22	78	1,20	-20
12	10	0,33	0,87	1,21	0,35	0,86	1,21	0,34	0,75	1,10	-10	0,22	78	1,21	-21

Таблица 3. Сравнительная оценка устойчивости стенки резервуара  $V=20\,000\text{ м}^3$  ( $H_{cr} = 18\text{ м}$ ) на основе рассмотренных норм с одним КЖ

№ пояса	$t_n$	ЕН			СП			ВБН			АР1				
		$\frac{\sigma_M}{\sigma_{M,кр}}$	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{K,кр}}$	$\Sigma$	$\Delta, \%$	$\frac{\sigma_M}{\sigma_{M,кр}}$	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{K,кр}}$	$\Sigma$	$\Delta, \%$	$\frac{\sigma_M}{\sigma_{M,кр}}$	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{K,кр}}$	$\Sigma$	$\Delta, \%$	Условие 1	$\Delta, \%$
1	16	0,18	0,31	0,48	0,20	0,15	0,35	0,21	0,10	0,31	65	0,19	81	0,47	53
2	13	0,28	0,31	0,59	0,31	0,25	0,56	0,31	0,17	0,48	44	0,19	81	0,57	43
3	12	0,33	0,31	0,64	0,35	0,30	0,66	0,35	0,21	0,56	34	0,19	81	0,62	38
4	12	0,32	0,31	0,62	0,34	0,30	0,64	0,34	0,21	0,55	36	0,19	81	0,63	37
5	12	0,30	0,31	0,61	0,33	0,30	0,63	0,32	0,22	0,54	37	0,19	81	0,64	36
6	11	0,36	0,31	0,67	0,38	0,37	0,75	0,38	0,28	0,66	25	0,22	78	0,83	17
7	11	0,34	0,31	0,65	0,36	0,37	0,74	0,36	0,29	0,65	26	0,22	78	0,85	15
8	11	0,33	0,31	0,63	0,35	0,37	0,72	0,34	0,30	0,64	28	0,22	78	0,86	14
9	11	0,31	0,31	0,62	0,33	0,37	0,70	0,33	0,31	0,63	30	0,22	78	0,87	13
10	11	0,29	0,31	0,60	0,32	0,37	0,69	0,31	0,31	0,62	31	0,22	78	0,87	13
11	10	0,35	0,31	0,66	0,37	0,47	0,85	0,36	0,41	0,77	15	0,22	78	0,98	2
12	10	0,33	0,31	0,64	0,35	0,47	0,83	0,34	0,42	0,76	17	0,22	78	0,98	2

этом Еврокод предлагает методику учета несовершенств только на стенке резервуара без ребер жесткости, то есть вопрос учета несовершенств при наличии КЖ остается не оговоренным. В свою очередь, в АРІ указано, что в формуле для определения толщин поясов при расчете на устойчивость заложен понижающий коэффициент 0,8, который учитывает возможные дефекты, однако какие именно дефекты и с какими параметрами учитывает данный документ, не указано.

2. Ни в одном из рассматриваемых нормативных документов не оговорен учет реальной эпюры ветрового давления для резервуаров, находящихся в группе.
3. Согласно таблице 3, при аналитическом расчете, в случае резервуара без колец жесткости, по заложенному запасу по устойчивости нормы расположились следующим образом:
  - Еврокод [1, 2] – для верхних двух поясов предельно допустимое значение превышено более чем на 20 %, начиная с 10-го пояса, превышение составляет 11 % и плавно снижается до 8 % в 6-ом поясе, в остальных поясах устойчивость обеспечена;
  - СП [12] – для верхних двух поясов превышение также более 20 %, однако, начиная с 10-го пояса, превышение резко снижается до 1–5 %, начиная с 5-го пояса, устойчивость обеспечена;
  - ВБН [7] – для верхних двух поясов превышение 10 %, начиная с 10-го пояса, устойчивость обеспечена с запасом более 11 %;
  - АРІ [8] – для верхних поясов превышение составляет более 20 % и снижается до 3 % в 6-ом поясе, в остальных поясах устойчивость обеспечена.
4. Согласно таблице 4, при аналитическом расчете, в случае резервуара с одним кольцом жесткости, устойчивость стенки обеспечена для всех рассмотренных норм, однако запасы устойчивости различные, в порядке приближения к предельно допустимой величине нормы расположились таким образом:

- АРІ [8] (для верхних поясов ресурс по устойчивости использован на 98 %, начиная с 10-го пояса, ресурс использован на 87 %, и этот показатель снижается до 53 % в 1-ом поясе);
- СП [12] (для верхних двух поясов ресурс по устойчивости использован на 81–83 %, начиная с 10-го пояса, ресурс использован на 70 %, и этот показатель снижается до 35 % в 1-ом поясе);
- ВБН [7] (для верхних поясов ресурс по устойчивости использован на 76–77 %, начиная с 10-го пояса, ресурс использован на 62 % и этот показатель снижается до 31 % в 1-ом поясе);
- Еврокод [1, 2] (для верхних поясов ресурс по устойчивости использован на 64–66 % и остается в пределах 50–67 % для всей оставшейся стенки).

Таким образом, при размещении на стенке резервуара КЖ, ввиду отличия методик учета такого конструктива, Еврокод увеличивает предельно допустимые кольцевые напряжения на большие значения, чем другие рассматриваемые нормы.

5. Таким образом, по результатам проведенного анализа можно выделить несколько направлений для дальнейшего исследования:
  - определение и анализ факторов, которые приводят к существенному отличию в запасах по устойчивости в различных нормативных документах для двух конструктивных вариантов стенки (с КЖ и без них). Получение вывода о наиболее рациональном варианте для каждого конструктивного случая;
  - уточнение выбранных методик, на предмет расположения КЖ, с учетом возможных ветровых эффектов для резервуаров, находящихся в группе, а также наличие возможных дефектов и несовершенств;
  - уточнение требований по конструктиву колец жесткости и определение влияния этого параметра на обеспечение прочности и устойчивости оболочки;
  - и как итоговая задача – уточнение запасов по устойчивости при наличии КЖ.

## Литература

1. Eurocode 3: Design of steel structures [Текст] – Part 1–6: Strength and stability of shell structures.

## References

1. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–6: Strength and stability of shell structures. Brussels:

- res. – Brussels : Management Centre, 2007. – 94 p. – (European Standard).
2. Eurocode 3: Design of steel structures [Текст] – Part 4–2. Tanks : EN 1993-4-2. – Brussels : Management Centre, 2007. – 55 p. – (European Standard).
  3. 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).
  4. 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).
  5. Eurocode 1 – Actions on structures [Текст] – Part 1–3: General actions – Snow loads : EN 1991-1-3. – Brussels : Management Centre, 2003. – 59 p. – (European Standard).
  6. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с. – (Державні будівельні норми).
  7. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов с давлением насыщенных паров не выше 93,3 кПа [Текст]. – Киев : Госкомнефтегаз, 1994. – 98 с.
  8. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage [Текст]. – Eleventh edition. – Washington, D. C. : API Publishing Services, 2011. – 449 p. – (USA Standard).
  9. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1 000–50 000 м<sup>3</sup> [Текст] / Открытое акционерное общество «Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть». – М. : ОАО «АК «Транснефть», 2007. – 141 с.
  10. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Текст]. Серия 03. Выпуск 69. – М. : Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с. – ISBN 978-5-9687-0531-0.
  11. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Текст] : СТО-СА-03-002-2009. – Введ. впервые ; действует с 2009–07–01. – Москва : Ростехэкспертиза, 2009. – 205 с. – ISBN 978-5-91187-117-8. – (Стандарт организации. Серия 03. Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр).
  12. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* [Текст]. – Введ. 2011–05–20. – М. : Минрегион России, 2011. – 173 с.
  13. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну Management Centre, 2007. 94 p. (European Standard).
  2. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4–2. Tanks: EN 1993-4-2. Brussels: Management Centre, 2007. 55 p. (European Standard).
  3. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions: EN 1991-1-4. Brussels: Management Centre, 2010. 149 p. (European Standard).
  4. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings: EN 1991-1-1. Brussels: Management Centre, 2002. 47 p. (European Standard).
  5. Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1–3: General actions – Snow loads: EN 1991-1-3. Brussels: Management Centre, 2003. 59 p. (European Standard).
  6. DBN V.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
  7. VBN V.2.2-58.2-94. Vertical steel tanks, holding crude oil and refined products, having vapor pressure not above 93,3 kPa. Kyiv: Goskomneftegaz, 1994. 98 p. (in Russian)
  8. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage. Eleventh edition. Washington, D. C.: API Publishing Services, 2011. 449 p. (USA Standard).
  9. ОАО «Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть». RD 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Codes of design of steel vertical reservoirs for oil storage with volume of 1 000–50 000 m<sup>3</sup>. Moscow: ОАО «АК «Транснефть», 2007. 141 p. (in Russian)
  10. Safety guide of vertical cylindrical steel reservoirs for oil and oil products. Series 03. Issue 69. Moscow: ZAO «Nauchno-tehnicheskiiy tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti», 2013. 240 p. ISBN 978-5-9687-0531-0. (in Russian)
  11. Rules of design, production and erection of vertical cylindrical oil storage tanks: STO-SA-03-002-2009. Moscow: Rostehexpertiza, 2009. 205 p. ISBN 978-5-91187-117-8. (in Russian)
  12. SP 16.13330.2011. Steel structures. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. 173 p. (in Russian)
  13. DBN V.2.6-163:2010. The constructions of buildings and structures. The steel constructions. Norms for design, fabrication and erection. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 127 p. (in Ukrainian)
  14. DSTU B V.2.6-183:2011. Vertical cylindrical steel tanks for storage of oil and oil products. General specifications. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. 82 p. (in Ukrainian)
  15. Type design 704-1-70. Steel vertical cylindrical tank of 20 000 volume for crude oil and refined products. Album I. Drawing design of tank. Moscow: Research and Development Establishment Projectsteel-constructions of State Committee for Construction of the USSR, 1972. 46 p. (in Russian)

- СНиП II-23-81\* окрім розділів 15\*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78-4.134; чинні від 2011–12–01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
14. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови (ГОСТ 31385-2008, NEQ) [Текст]. – На заміну ВБН В.2.2-58.2-94 розділи 1, 2, 3 (п.п. 3.1–3.11), 4, 11 і додатки 1– 3, 10, 11.1, 12; введ. 2012–10–01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 82 с.
  15. Типовой проект 704-1-70. Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 куб. м [Текст]. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. – М.: ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. – 46 с.
  16. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* [Текст]. – Введ. 20–05–2011. – М.: Минрегион России, 2011. – 80 с. – (Свод правил).
  17. Правил устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуара для нефти и нефтепродуктов (ПБ 03-605-03). Серия 03. Выпуск 3 [Текст] / Колл. авт. – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2008. – 172 с. – ISBN 978-5-9687-0057-5.
  16. SP 20.13330.2011. Loads and effects. Updated reaction SNiP 2.01.07-85\*. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. 80 p. (in Russian)
  17. Rule for design of vertical cylindrical steel reservoirs for oil and oil products (PB 03-605-03). Series 03. Issue 3. Moscow: Scientific-technical centre on industrial safety, 2008. 172 p. ISBN 978-5-9687-0057-5. (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** – 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.

**Мущанов Володимир Пилипович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і 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-корреспондент Академії архітектури України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Цепляєв Максим Миколайович** – аспірант кафедри теоретичної і прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вивчення впливу локальних напружень на міцність і стійкість вертикальних циліндричних резервуарів.

**Mushchanov Volodymyr** – D.Sc. (Engineering), 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.

**Тєрлієв Максим** – Assistant; 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.