





doi: 10.18720/CUBS.72.4

Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жёсткости

Ensuring the stability of the walls of the tanks based on the rational arrangement of the stiffening rings

М.Н. Цепляев ^{1*}, В.Ф.. Мущанов²

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 86123, Украина, Донецкая область, Макеевка, ул.Державина, 2

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вертикальный цилиндрический резервуар; напряжения; метод конечных элементов; цилиндрическая оболочка; локальные напряжения; кольца жёсткости

M. Tcepliaev ^{1*}, V. Mushchanov ²

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,2, Derzhavin str., Makiyivka, Donetsk region Ukraine, 86123

KEYWORDS

vertical cylindrical tank; stress; finite element method; cylindrical shell; local stress; stiffening rings

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрена проблема обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров посредством наиболее оптимального расположения горизонтальных промежуточных колец жёсткости. Задача определения положения решается на основе метода конечных элементов при помощи программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4. Рассматривались резервуары объемом 10000 м3, 20000 м3 и 30000 м3. Последовательным моделированием резервуаров с различным количеством и шагом колец, определялись коэффициенты запаса устойчивости стенки резервуара. По полученным данным построены зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости от количества и шага колец жесткости. Проведено технико-экономического обоснование границ применения колец жесткости. В результате, получены выражения для рационального размещения колец. Использование полученных выражений позволяет повысить коэффициент запаса устойчивости стенки на 2-5% по сравнению с размещением, согласно действующим нормативным документам. При этом расход стали не увеличивается.

ABSTRACT

In this paper, we consider the problem of ensuring the stability of the walls of vertical cylindrical tanks through the most optimal arrangement of horizontal intermediate stiffening rings. The problem of determining the position is solved on the basis of the finite element method using the LIRA-CAD 2015 R4 program. Tanks with a volume of 10000 m3, 20000 m3 and 30000 m3 were considered. By using consistent modeling of tanks with different number and step of rings, were determine the factors of stability of the tank wall. According to the obtained data, dependences of the change in the stability factor on the number and pitch of stiffening rings are plotted. The feasibility study of the boundaries of the use of stiffening rings has been carried out. As a result, expressions for rational placement of rings are obtained. The use of the obtained expressions allows to increase the factor of stability of the wall by 2-5% compared with the placement, according to the current standards. At the same time, steel consumption does not increase.

Содержание

1.	Введение	59
2.	Методы	60
3.	Результаты и обсуждение	65
4.	Заключение	71

1. Введение

1.1 Описание объекта исследования, актуальность исследования

Начиная с двухтысячных годов, в мире возрастает тенденция к использованию альтернативных источников энергии. В особенности данные изменения заметны в последние пять лет. Несмотря на это, потребность в нефти продолжает расти, и по прогнозам многих исследователей [8] и ведущих нефтяных компаний такая динамика сохранится в течение ближайших 15-20 лет. Кроме того, бурно развивается химическая промышленность, необходимым технологическим сооружением в которой являются вертикальные стальные цилиндрические резервуары. Таким образом, потребность, в ближайшей перспективе, в таких конструкциях будет расти. Также, актуальной проблемой, особенно для стран постсоветского пространства, является наличие большого количества резервуаров, нормативный срок эксплуатации которых подходит к концу [14]. И хотя техническое состояние иногда позволяет продолжать эксплуатировать подобные конструкции, возросшие требования к обеспечению надежности, другие требования [27] не позволяют продлить эксплуатацию данных конструкций без усиления. В частности, говоря об обеспечении устойчивости стенки резервуара, необходимо отметить два принципиальных подхода – подбор достаточной толщины стенки, либо установка усиливающих элементов на стенку резервуара. При этом, в случае капитального ремонта, есть возможность применения только второго подхода. Однако, в различных источниках и нормативных документах приведены различные требования и рекомендации к шагу и конструкции колец жесткости, что делает актуальным вопросом совершенствования и уточнения существующих усилению стенок резервуаров методик по горизонтальными кольцами жёсткости.

Таким образом, объектом данного исследования является: методика обеспечения устойчивости стенки резервуара постановкой горизонтальных колец жёсткости. Предметом исследования рациональное расположение колец жесткости.

1.2 Обзор литературы

1.2.1 Обзор нормативных документов

Обзор нормативных методик проектирования резервуаров с кольцами жёсткости рассмотрен в статье [17], поэтому здесь будут приведены только выдержки из данной работы. Так, авторами отмечено, что некоторые нормативные документы предлагают методику, суть которой в расположении колец жёсткости с равным шагом по эквивалентной высоте резервуара. Эквивалентная (редуцированная) высота меняется в зависимости от отношения толщины самого тонкого пояса к остальным. В частности, такая методика приведена в API [4], Еврокоде [6], также аналогичная методика приведена в отраслевых нормах РФ [1]. При этом, только в Еврокоде есть определённые указания по рекомендуемому количеству колец жёсткости. В основном и обязательном нормативном документе РФ – СП 20.13330.2011 указаний по шагу и количеству колец жёсткости не приводится. Также, во всех рассмотренных документах отсутствуют указания о границах экономической целесообразности применения колец.

Таким образом, предложенные методики размещения оставляют ряд вопросов и не имеют привязки к габаритам и действующим нагрузкам на резервуары. Следовательно, в рассмотренных нормативных документах вопрос размещения колец жёсткости требует дополнительного изучения.

1.2.2 Обзор публикаций и книг

Анализ работы стенки резервуара, усиленной кольцами жесткости, встречается во многих литературных источниках и публикациях, здесь будут рассмотрены лишь наиболее близкие к рассматриваемому вопросу [14, 15, 20, 21, 26, 30]. Все авторы отмечают эффективность применения горизонтальных колец жёсткости для повышения устойчивости стенки, находящейся под внешним давлением. Под внешним давлением, чаще всего, подразумевается ветровая нагрузка и вакуум.

Во всех трудах, кроме [26] рассматривается работа резервуаров с кольцами под действием реальной эпюры ветрового давления. Рассмотрим данные источники более подробно ниже.

В статье [15] рассматривается резервуар с одним кольцом жёсткости, расположенным на половине высоты стенки. Авторы отмечают, что в отечественных документах отсутствуют указания по расстановке колец жёсткости и методы учёта наличия кольца требуют уточнения. Однако конкретных предложений в работе не приводится.

В работе [14] рассматривается случай усиления реального резервуара объёмом 5000 м3 двумя кольцами жёсткости нестандартного сечения. В результате оба кольца были расположены в верхней части стенки резервуара. Авторы подчёркивают эффективность такого метода, тем не менее, не приводят обоснования размещения колец.

В исследовании [21, 22] определена величина КЗУ стенки в зависимости от шага и количества колец жёсткости для цилиндрической оболочки, под равномерным внешним давлением. Однако, габариты рассматриваемых конструкций относятся к дымовым трубам, либо цилиндрическим силосам. Таким образом, полученные результаты не могут быть применены к резервуарам большого объёма.

В работе [22] при помощи расчётного комплекса Ansys проводится сравнение устойчивости стенки резервуара с кольцами жёсткости и без. В качестве нагрузки рассматривается ураганный ветер до 80 м/с. Учитывается случай наличия двух колец в верхней части стенки резервуара. Методика, по которой было выбрано такое расположение не приводится. Однако отмечено, что постановка двух колец позволила повысить КЗУ стенки более чем в 2 раза.

В книге [28] рассматривается работа стенки резервуара с одним кольцом жёсткости, а также проводится сравнение с аналогичным резервуаров без кольца. В результате отмечено, что постановка одного кольца жёсткости повышает сопротивление потери устойчивости в 1,5 раза. При этом кольцо располагалось немного выше середины высоты стенки. Обоснование такого размещения не приводится.

Также повышение устойчивости стенки постановкой кольца жёсткости рассматривается в книге [29]. Рассматривается резервуар с одним кольцом жёсткости на ³/₄ высоты стенки. Авторы рассматривают различные варианты конструктива кольца, а также учёта кольца при расчётах, однако принцип размещения кольца не приводится. В статье [30] авторы решают задачу уточнения методики проектирования резервуара с кольцами жёсткости. Сравнение производится с методикой приведенной в нормативном документе США [4]. Расчёты производятся с использованием комплекса Ansys. Итогом работы является рекомендация по уточнению минимальной высоты стенки не требующей подкрепления, в зависимости от скорости ветра и диаметра резервуара. Однако сам шаг колец принимается постоянным, вне зависимости от их количества и ветровой нагрузки. Также не приводится исследования границ экономической целесообразности постановки колец.

Таким образом, несмотря на большое количество публикаций по рассматриваемой проблеме, вопрос обеспечения оптимального размещения колец жёсткости по стенке цилиндрического резервуара требует дополнительного изучения.

1.3 Постановка цели исследования с перечнем решаемых задач

В связи с обозначенной проблематикой целью данной работы является определение рационального шага колец жесткости для резервуаров различных объёмов, исходя из условия обеспечения максимального коэффициента запаса устойчивости и минимального расхода стали.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

 на основе численного моделирования на примере 1-го кольца жесткости определить, при каком положении возникает максимальный коэффициент запаса устойчивости (от действия ветровой нагрузки) и далее провести аналогичные исследования при большем количества колец;

- проанализировать изменение коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) при размещении колец жёсткости (КЖ) по выбранному принципу с варьированием объёма резервуара;

- сравнить КЗУ, получаемый при нормативном и альтернативном размещении колец жёсткости, и выбрать наиболее эффективный вариант;

- с использованием предложенной методики определить рациональное количество колец жесткости на основе экономических показателей.

2. Методы

Определение рационального расположения колец жесткости предлагается анализировать на примере вертикальных цилиндрических резервуаров объёмом 10000 – 30000 м3 со стационарной сферической кровлей, поскольку резервуары такого типа являются широко применяемыми как в мире, так и в странах постсоветского пространства.

Численное моделирование будет выполняться методом конечных элементов с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4.

Процесс задания нагрузок и определение необходимых величин для расчета описаны ниже.

2.1 Расчётная нагрузка

Основной нагрузкой при расчёте резервуаров больших объемов на устойчивость является сочетание ветра и вакуума [2] (в данном исследовании будет рассматриваться реальная эпюра ветрового давления). Важность учёта реальной формы распределения ветрового потока отмечается многими исследователями [12, 13, 19, 24, 25, 26]. В частности, это позволяет учесть фактическое, а не идеализированное, распределение напряжений и, как следствие, уточнить КЗУ стенки. Однако, в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4, как и в других аналогичных универсальных расчетных комплексах, отсутствует возможность задание переменной нагрузки на криволинейную поверхность [16, 19]. Для решения этого вопроса будет использоваться способ задания нагрузки через текстовый файл, суть которого изложена в статьях [16].

Важным вопросом является определение страны, по нормативным документам которой выполнять определение нагрузки. В работе [23] проводится сравнение ветровой нагрузки по Еврокоду [6] и API [4] (основной документ для расчёта резервуаров в США). Отмечено, что API предлагает приводить

распределённое ветровое давление к упрощённому равномерно-распределённому. В связи с отмеченной выше необходимостью учёта реального распределения ветрового потока, нагрузка согласно API не рассматривалась.

На сегодняшний день в странах СНГ, в том числе РФ, ведётся работа по внедрению Еврокодов. Тем не менее, наряду с Еврокодами, имеющиеся нормативные документы не отменяются и продолжают уточняться. В работе [17] приведено сравнение ветровой нагрузки по Еврокоду [7] и СП [3]. В результате отмечено, что итоговые значения ветрового давления значительно отличаются, в связи с различной величиной коэффициентов возрастания по высоте. Однако, в горизонтальной плоскости эпюры распределения ветрового давления на стенку резервуара не имеют существенных отличий.

Следовательно, для предварительных рекомендаций достаточно использовать один из нормативных документов, поэтому в данном исследовании форма и коэффициенты распределения ветровой нагрузки принимаются только по СП [3].

Поскольку целью данного исследования является получение рекомендаций общего характера, характеристическое значение ветровой нагрузки принято условно, без привязки к конкретному региону, и равно 500 Па. Нагрузка от вакуума принята стандартной [10], равной 250 Па.

2.2 Создание конечно-элементной модели

Применение комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 обусловлено возможностью вычисления коэффициента запаса устойчивости в отдельном элементе модели [16]. Это важно, поскольку полностью смоделированная кровля, промежуточные и опорные кольца могут позволить выявить дополнительные сведения о работе конструкции. При этом КЗУ вычисляется только для интересующего нас элемента. Дополнительно следует заметить, что в исследовании рассматривается только первая форма потери устойчивости.

В качестве исследуемых приняты резервуары объёмом: 10000 м3, согласно типовому проекту [9], 20000 м3, согласно типовому проекту [10] и 30000 м3 – типовой проект [11]. Размеры колец жёсткости рассчитывались для каждого типоразмера резервуара, по требованиям СП 16.13330.2011.

Возможность использования комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4, верификация и подбор сетки конечных элементов для аналогичной модели резервуара обоснованы в статье [18], поэтому в данном исследовании подробно приводиться не будут. Стенка, основное и промежуточные кольца жесткости моделировались пластинчатыми конечными элементами, ребристо-кольцевой купол покрытия - стержневыми элементами. Основание принято жёстким. Возможные геометрические дефекты и несовершенства резервуаров не учитывались. Общий вид сформированной модели резервуара объёмом 20000 м3 без колец жёсткости приведён на рисунке 1:



Рисунок 1. Модель резервуара в ЛИРА-САПР 2015 R4

2.3 Определение положения колец жесткости, обеспечивающего наибольший КЗУ стенки резервуара объёмом 20000 м3

С целью уменьшения количество исследуемых моделей первоначальные исследования выполняются на резервуаре объёмом 20000 м3.

Суть данного этапа исследования состоит в сравнение КЗУ элементов стенки, возникающих при размещении колец по нормативным документам и альтернативным вариантам, для резервуаров различного объёма. В ходе исследования толщина стенки резервуара при размещении колец оставалась постоянной.

2.3.1 Определения КЗУ при нормативном размещении колец для ВЦР 20000 м3

На сформированную модель приложена расчетная нагрузка, сформированная в соответствии с требованиями, изложенными в пункте 2.1. Расположение колец жёсткости моделировалось в соответствии с нормативными документами (перечень документов и положение колец жесткости на стенке резервуара приведены в таблице 1 раздела 3). Поскольку некоторые из рассмотренных документов не дают указаний по требуемому количеству колец, а Еврокод [5, 6] и АРІ [4] требуют расположение двух КЖ, то сравнение будет проводиться с учётом размещения двух колец. Для всех указанных случаев в программе ЛИРА-САПР 2015 R4 были вычислены соответствующие КЗУ.

2.3.2 Определения КЗУ при альтернативном размещении колец для ВЦР 20000 м3

Методом численного моделирования были проведены исследования с целью определения местоположения кольца, при котором значение КЗУ стенки превысило бы его значение, полученное для стенки с нормируемым расположением КЖ (при соответствующем количестве колец). Для этого в расчетной схеме резервуара объёмом 20000 мЗ моделировалось одно КЖ в промежутке от 9 до 17 м по высоте резервуара с шагом 1,5 м. Для каждого смоделированного случая расположения кольца определялся КЗУ стенки. Таким образом, был определён интервал, в котором необходимо искать наиболее выгодное положение кольца. Далее в указанном интервале, последовательно располагая кольца с меньшим шагом, было уточнено положение, при котором КЗУ стенки резервуара оказывается максимальным. Всего было рассмотрено 10 моделей с одним кольцом жёсткости, часть из них приведены на рисунке 2. Полный перечень моделей с указанием высоты размещения колец приведён в таблице 2 раздела



жёсткости

Для фиксации оптимального месторасположения КЖ была предложена величина, учитывающая переменную толщину стенки участков на которые делят стенку резервуара кольца жёсткости. Такой величиной, в данном исследовании будет отношение высоты участка к средней толщине участка - «гибкость» (формула 1).

$$\lambda = \frac{H^2}{\sum_{i=1}^n t_i h_i}$$
 (1), где

Н – высота рассматриваемого участка между КЖ (либо от кольца до кровли, либо до основания);

ti – толщина i-го пояса входящего в участок H;

hi – высота i-го пояса ограниченная участком H;

Далее были проведены аналогичные численные исследования для случаев 2-х колец, расположенных на стенке резервуара. Поскольку для случая наличия двух колец существует достаточно большое количество комбинаций, то в первую очередь рассматривались следующие случаи:

- с равным шагом;
- смещённые вверх;
- с равной условной гибкостью между участками;

- с использованием полученного оптимального соотношения между гибкостями участков для 1-го КЖ.

Высота размещения колец приведена в таблице 4 раздела 3. Смоделированные модели резервуаров с различно расположенными кольцами жесткости приведены на рисунке 3.



Рисунок 3. Фрагменты моделей резервуаров с различным размещением двух колец жёсткости

Из вариантов с двумя КЖ далее рассматривается тот, который обеспечивает максимальный КЗУ. Для выбранного варианта, последовательно варьировалось положение сначала верхнего, а затем нижнего кольца. Таким образом, было смоделировано ещё 5 моделей и выполнена оценка КЗУ стенки. В результате определена величина максимального КЗУ при наличии двух колец жесткости и зафиксировано их положение. Как и в случае с одним кольцом положение фиксировалось в виде отношения между гибкостями участков.

2.3.3 Сравнение наилучшего «нормируемого» и альтернативного варианта размещения колец

Из случаев нормируемого (п. 2.3.1) и альтернативного (п. 2.3.2) размещения колец жёсткости было выбрано по одному варианту. Выбор производился из соображений обеспечения максимального КЗУ стенки.

Для каждого из выбранных вариантов размещения были созданы модели резервуаров с количеством колец от одного до пяти. В программном комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 были определены КЗУ стенки и проведено сравнение возникающих КЗУ в зависимости от количества колец для каждого из двух выбранных вариантов размещения, и таким образом, на примере резервуара объёмом 20000 мЗ, было предварительно определено рекомендуемое расположение колец жёсткости, выраженное через соотношение гибкостей рассматриваемых участков.

2.4 Определение положения колец жесткости обеспечивающее максимальную устойчивость стенки резервуаров объёмом 10000 и 30000 м3

Аналогичное исследование было проведено для резервуаров других объёмов, а именно 10000 и 30000 м3. Однако рассматривались только наиболее выгодные из нормируемых и альтернативных вариантов размещения колец, выбранные для резервуара объёмом 20000 м3. Исследование проводилось путём моделирования резервуаров 10000 м3 и 30000 м3 с одним и двумя кольцами

жесткости. В результате сделан вывод о применимости полученных результатов в п. 2.3.3. Из двух вариантов был выбран случай, обеспечивающий максимальный КЗУ стенки. По полученным данным сделан вывод о соотношении между гибкостями участков, при которых КЗУ оказывается максимальным.

2.5 Сравнение полученных данных

По результатам исследований изложенных в пунктах 2.3 и 2.4 сделаны выводы о соотношении между гибкостями участков, на основании которых КЗУ стенки резервуара оказывается максимальным. Соотношения определены для каждого типоразмера резервуара, однако полученных данных недостаточно чтобы сделать вывод о экономически целесообразном количестве колец. В связи с этим, для решения такой задачи при выбранных соотношениях гибкостей участков были проведены дополнительные исследования.

2.6 Определения рационального количества колец жёсткости

2.6.1 Установление интенсивности вырастания КЗУ

Очевидно, что с увеличением количества колец устойчивость стенки будет только возрастать. Однако важно знать интенсивность такого возрастания. Это наглядно может представить область, в которой постановка колец приводит к максимальному возрастанию КЗУ. В связи с этим, для определения интенсивности анализировались зависимости, представленные в виде графиков функции КЗУ стенки от количества колец жёсткости для каждого из типоразмеров исследуемых резервуаров (количество колец, на графике выражено опосредствованно через гибкость λ). Кольца размещаются исходя из требования обеспечения максимального КЗУ.

2.6.2 Установление зависимостей изменения общего веса конструкций при постановке КЖ

Задача определения рационального количества колец жёсткости будет решаться расчётом веса металлоконструкций резервуара в зависимости от различного количества колец. Изменение толщины стенки вследствие установки колец жёсткости определяется исходя из требований прочности и устойчивости. Исходя из этого, определяется максимальное количество колец, позволяющее снизить вес металлоконструкций резервуара в целом.

Предварительно был произведён расчёт на прочность, согласно методике, приведенной в СП 16.13330.2011. В качестве хранимого нефтепродукта принималась сырая нефть с плотностью 900 кг/м3. Также, важно отметить, что согласно конструктивным требованиям [2], существует минимально допустимая толщина стенки. Аналогичные требования по минимальной толщине стенки приведены в API [4] и Еврокоде [6], что учитывалось при конструировании стенки.

Обеспечение устойчивости решалось на основе подхода, нормируемого в СП 16.13330.2011, поскольку нагрузки также были собраны по нормам Российской Федерации. Обеспечение устойчивости проверяется согласно неравенству 2.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{CR1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{CR2}} \le \gamma_C = 1$$
 (2)

Величины возникающих напряжений от ветра и вакуума определены на основе конечноэлементного расчета с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4. Значения критических напряжений определяются аналитически по формулам, приведенным в СП 16.13330.2011.

Постановка колец жёсткости влияет на кольцевые критические напряжения оСR 2, определяемые по формуле 3. Наличие колец учитывается заменой высоты стенки I в формуле 3 на высоту участка между кольцами жесткости:

$$\sigma_{CR,2} = 0.92E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r}\right)^{1.5}$$
 (3)

3. Результаты и обсуждение

3.1 Результаты размещения колец по нормативным методикам

Список нормативных документов, рассматриваемых при анализе, высота от уровня земли до каждого из двух колец жесткости, а также полученные в результате значения коэффициента запаса устойчивости стенки приведены в таблице 1.

		Таблица 1. КЗУ стенк	енки при нормативном размещении колец		
Нормативный документ	Высота расположения колец, м	Отношение между гибкостями участков λ (сверху-вниз)	КЗУ стенки	Примечание	
СП (равный шаг)	H ₁ =6,15; H ₂ =12,15	$\lambda_1 / \lambda_2 = 1,14; \lambda_2 / \lambda_3 = 1,04$	5,89	Нет указаний по размещению и количеству	
СТО	H ₁ =7,8; H ₂ =13,3	$\lambda_1 / \lambda_2 = 0.91; \lambda_2 / \lambda_3 = 0.83$	5,98	Нет указаний по шагу	
Еврокод	H ₁ =5,9; H ₂ =12,6	$\lambda_1 / \lambda_2 = 0.87; \lambda_2 / \lambda_3 = 1.34$	5,39		
API	H ₁ =7,8; H ₂ =13,3	$\lambda_1 / \lambda_2 = 0.91; \lambda_2 / \lambda_3 = 0.83$	5,98	Нет указаний по количеству	

Методики АРІ [4] и СТО [1] приводят к одинаковому расположению колец. Кроме того, именно такое расположение обеспечивает максимальную устойчивость стенки, для случая рассматриваемых нагрузок.

3.2 Результаты альтернативного размещения колец

3.2.1 Оптимальное соотношение гибкостей участков при наличии одного кольца

Значения КЗУ стенки для резервуара объёмом 20000 м³, в зависимости от местоположения одного КЖ приведено в таблице 2:

Высота расположения кольца, м	Отношение между гибкостями участков λ (сверху- вниз)	КЗУ стенки	
9.15	1.15	4.36	
10,65	0,81	4,7	
12,15	0,56	4,38	
13,65	0,37	4,2	
15,15	0,23	4,05	
16,65	0,096	3,6	
17,65	0,023	2,1	

Таблица 2. КЗУ стенки при различном положении одного КЖ

65

Из таблицы 2 определён промежуток (с 9,15 до 12,15 м) где следует искать положения кольца, при котором КЗУ будет максимальным. Далее, как описано в пункте 2.3.2, для указанного промежутка были выполнены дополнительные численные исследования и определено наиболее выгодное положение одного кольца. Высота данной точки 10,95 метров, КЗУ составил 4,88. Гибкость верхнего участка составила 6,62, нижнего – 8,89. Первая форма потери устойчивости стенки резервуара для резервуара с оптимальным размещением одного кольца жёсткости приведена на рисунке 4:



Рисунок 4. Первая форма потери устойчивости резервуара объёмом 20000 м³ с одним КЖ

Таким образом, для рассматриваемого резервуара объёмом 20000 м³ оптимальное отношение между гибкостями участков λ, для случая одного кольца, составило 0,74.

3.2.2 Оптимальное соотношение гибкостей участков при наличии двух и более колец

Согласно описанной последовательности действий в п. 2.3 было выполнено моделирование резервуара с двумя кольцами в различных вариантах их расположения. Произведён расчёт и определены КЗУ стенки, результаты приведены в таблице 3:

	Таблица 3. КЗУ стенки при различном положении двух КЖ			
Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков λ (сверху-вниз)	КЗУ стен ки	
С равным шагом	H ₁ =6,15; H ₂ =12,15	$\lambda_1 / \lambda_2 = 1,14; \lambda_2 / \lambda_3 = 1,04$	5,89	
Смещённые вверх	H ₁ =12,3; H ₂ =15,25	$\lambda_1 / \lambda_2 = 1,02; \lambda_2 / \lambda_3 = 0,268$	4,9	
С равной условной гибкостью между	H6 6' H12 5	$\lambda_{1}/\lambda_{2}=1:\lambda_{2}/\lambda_{2}=1$	6,33	
участками	$\Pi_1 = 0, 0, \Pi_2 = 12, 0$	$N_1 N_2 - 1; N_2 N_3 - 1$		
Гибкость верхнего участка 0,74 от				
нижележащего (оптимальное	H ₁ =8,65; H ₂ =14,2	$\lambda_{1}/\lambda_{2} = 0.74; \lambda_{2}/\lambda_{2} = 0.74$	5,95	
отношение для резервуара с одним		N ₁ / N ₂ -0, / 4, N ₂ / N ₃ -0, / 4		
КЖ)				

Для дальнейшего анализа были отобраны два последних варианта из таблицы 3. Далее способом, описанным в пункте 2.3.2, определено положение двух колец жесткости, при котором КЗУ стенки принял максимальное значение и составил 7,26. В этом случае высота расположения нижнего и верхнего колец составила, соответственно, 8 м и 13,6 м. С учётом округления, указанное местоположение соответствует отношению между гибкостями первого и второго участка $\lambda_1/\lambda_2=0.85$, а второго и третьего $\lambda_2/\lambda_3=0.8$.

Далее, для проведения численного исследования при наличии трёх колец жёсткости (с учётом полученных результатов для случая двух колец), рассмотрены следующие варианты: 1) расположения колец с равной гибкостью между участками;

2) расположение колец, исходя из соотношения гибкостей $\lambda_1/\lambda_2=0.85$ и $\lambda_i/\lambda_{i+1}=0.8$, где λ_i – гибкость іучастка (кроме первого), а λ_{i+1} – гибкость нижележащего участка относительного і-го.

В результате, КЗУ по первому случаю расположения составил 8,95, по второму – 9,89. Дальнейшие вариации расположения 3-х колец, опираясь на расположение по второму случаю не позволили определить большее значение КЗУ.

3.2.3 Вывод об наиболее выгодном альтернативном размещении КЖ

Из рассмотренных вариантов в пунктах 3.2.1-3.2.2, были определены две принципиальные зависимости между гибкостями участков, при которых КЗУ стенки оказывается максимальным: 1) для случая размещения одного КЖ - λ₁/ λ₂=0,74;

для случая размещения двух и более КЖ - λ₁/ λ₂=0,85 и λ_i/ λ_{i+1}=0,8

В качестве обозначение принято: λ1 – гибкость верхнего (первого) участка, λ2 – гибкость второго участка; участка; λi – гибкость i-участка (кроме первого), а λi+1 – гибкость нижележащего (относительного i-го) участка.

3.3 Сравнение наиболее выгодного нормируемого и альтернативного случаев размещения колец жесткости

Сравнивалась изменение максимальных значений КЗУ стенки для случаев размещения колец жесткости в соответствии с требованиями нормативных документов (п. 3.1) и в соответствии со сформулированными в п. 3.2.3 соотношениями при вариантах размещения от одного до пяти колец. Результаты приведены в таблице 4.

	Таблица 4. Изменение максимального КЗУ с ⁻					о КЗУ стенки
Вариант размещения			КЗУ стенки, п	ри количестве н	олец	
	1, шт	2, шт	3, шт	4, шт	5, шт	6, шт
СТО	4,2	5,98	9,49	11,4	13,85	16,72
По п. 3.2.3	4,42	6,24	9,89	11,84	14,16	17,07
Разница (от СТО), %	5,2	4,3	4,2	3,9	2,2	2,1

Расположение колец из принципа отношения гибкостей сформулированного в п. 3.2.3 позволяет повышать КЗУ на 2-5% по сравнению с наиболее выгодным нормативным размещением. Таким образом, на примере резервуара объёмом 20000 м³, получено наиболее выгодное отношение между гибкостями участков, с точки зрения обеспечение устойчивости от действия ветровой нагрузки и вакуума.

Далее, согласно описанной в п. 2.4 последовательности, полученное отношение было проверено на резервуарах других объёмов, а именно 10000 и 30000 м³. Полученные результаты также показывают увеличение КЗУ стенки в диапазоне 2-5%. Следовательно, все дальнейшие исследования будут приводиться с учётом того что кольца расположены из принципа отношения гибкостей сформулированного в пункте 3.2.3.

3.4 Рациональное количество колец с точки зрения обеспечения максимального КЗУ

Полученное соотношение гибкостей, и соответствующих им значений КЗУ, тем не менее, не даёт понимания о рекомендуемом количестве колец для каждого из рассматриваемых типоразмеров резервуаров. Для решения задачи определения рациональности использования колец, в первую очередь, были проанализированы зависимости «КЗУ – λ ». Поскольку определяющей в дальнейшем анализе рациональности размещения колец является гибкость первого участка (λ_1), то для проанализированных типоразмеров резервуаров объёмом 10000 м³, 20000 м³, 30000 м³ отмеченные зависимости будут представлены в виде «КЗУ - λ_1 », соответственно, на рис. 5, 6, 7.



Рисунок 5. Зависимость КЗУ от λ₁ для резервуара объёмом 10000 м³



Рисунок 6. Зависимость КЗУ от λ₁ для резервуара объёмом 20000 м³



Рисунок 7. Зависимость КЗУ от λ₁ для резервуара объёмом 30000 м³

Для резервуара объёмом 10000 м³ (рис. 4) видно, что при гибкости первого участка λ₁ < 450 КЗУ стенки резко возрастают. Для резервуара объёмом 20000 м³ (график 5) КЗУ резко возрастают при λ₁<350. Для резервуара объёмом 30000 м³ (график 5) КЗУ резко возрастают при λ₁<275.

Кроме того, для различных объёмов резервуаров вид зависимостей (рис. 4-6) не имеет существенных отличий. Это также видно при сравнении функционального описания приведенных зависимостей. Уравнения зависимости КЗУ от гибкости верхнего участка были получены с использованием функции аппроксимации в комплексе Microsoft office Excel:

- для резервуара V=10000 м3, у=8821,7х^{-1,17}

- для резервуара V=20000 м3, у=13205х^{-1,264}

- для резервуара V=30000 м3, у=19407х^{-1,338}

Видна чёткая зависимость роста КЗУ в зависимости от объёма резервуара. Полученные функциональные зависимости позволяют сделать вывод о применимости полученных данных для резервуаров промежуточных объёмов в диапазоне 10000 – 30000 м³.

3.5 Рациональность размещения колец жесткости с точки зрения расхода стали

Для выбранной методики размещения (пункт 3.3) определено изменение общего веса металлоконструкций резервуара, в зависимости от количества колец жёсткости, как это описано в пункте 2.6.2. Учитывалось снижение требуемой толщины стенки за счёт постановки различного количества колец жёсткости. Исследование проводилось на примере всех рассматриваемых типоразмеров резервуаров. Сравнение приведено в виде зависимостей на рис. 8...10. На каждом из графиков представлены две

зависимости: одна показывает изменение веса только стенки, вторая – изменение веса стенки с учётом наличия колец жёсткости на ней.



Рисунок 8. Изменения веса резервуара объёмом 10000 м³ в зависимости от количества колец жесткости



Рисунок 9. Изменения веса резервуара объёмом 20000 м³ в зависимости от количества колец жесткости



Рисунок 10. Изменение веса резервуара объёмом 30000 м³ в зависимости от количества колец жесткости

Анализируя представленные зависимости можно отметить:

- для резервуара объёмом 10000 м³ снижение общего веса конструкций отмечается при установке до трёх колец, при постановке 4-х колец и более рационального эффекта не наблюдается;

- для резервуара объёмом 20000 м³, общий вес конструкций снижается при установке до 3-х колец включительно, постановка следующих колец, также, не приводит к существенной экономии стали;

- для резервуара объёмом 30000 м³, общий вес конструкций снижается при установке до 4-х колец включительно. При установке последующих колец, как и для выше рассмотренных случаев, получаем аналогичный эффект.

Полученные зависимости можно объяснить отличиями напряжённо-деформированного состояния стенки резервуара с кольцами жёсткости и без. Так отмечено, что постановка колец жёсткости снижает кольцевые напряжения в стенке лишь в зонах его крепления, а меридиональные напряжения перераспределяются, но их максимальные значения изменяются незначительно. То есть, расчётные значения в пределах каждого пояса остаются практически неизменными. Отсюда логично следует, что повышение устойчивости стенки при установке колец жесткости достигается за счёт изменения величин критических значений кольцевых и меридиональных напряжений. Также, дополнительным объяснением существенного эффекта снижения веса стенки может служить и наличие конструктивных требований к толщине стенки в расчёте на прочность.

3.6 Рекомендации по уточнению требуемого шага колец

Исходя из данных полученных в пунктах 3.4 и 3.5, можно сделать вывод о рациональном количестве и необходимой гибкости участков 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. Все выводы получены с учётом расположения колец на основе принципа, сформулированного в пункте 2.2.3, при котором КЗУ оказывается максимальным. В качестве сравнительной единицы рассматривается гибкость первого участка. Исходя из пункта 3.4 определено:

- для резервуаров с г/t_{экв}=1555 КЗУ стенки резко возрастает при гибкости λ_1 первого участка менее 450;

- для резервуара с r/t_{экв}=1710 при λ₁ менее 350;

- для резервуара с r/t=1669 при λ₁ менее 275.

Исходя из пункта 3.5 определено:

- для резервуаров с г/t_{экв}=1555 оптимальное количество КЖ не более 3-х, что соответствует гибкости первого участка более 420;

- для резервуара с г/t_{экв}=1710 оптимальное количество КЖ также не более 3-х, что соответствует гибкости первого участка более 330;

- для резервуара с r/t=1669 оптимальное количество КЖ не более 4-х, что соответствует гибкости первого участка более 230.

Поскольку распределение ветрового потока, согласно СП [3] имеет одинаковую форму, для скоростей ветра до 50 м/с, допустимо ввести в полученную зависимость учёт величины ветрового давления. Полученные рекомендованные значения гибкостей определены для расчётной скорости ветра 500 Па что соответствует 29 м/с. На примере нескольких моделей резервуаров было определено что увеличение скорости ветровой нагрузки пропорционально снижает КЗУ. Следовательно, используя зависимость (1) и полученные данные получено выражение (4) для определения необходимой гибкости первого участка для рассмотренных типоразмеров резервуаров:

$$\frac{h}{t_{_{3KG}}} = \frac{29}{V_p} \cdot \lambda$$
,(4) где

V_ρ – расчётная скорость ветра, λ – рекомендованная гибкость первого участка при расчётной скорости ветра.

Величина λ, для каждого из рассматриваемых резервуаров, будет равна:

1) для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с r/H =0,79, гибкость λ=h/t_{экв}=420..450;

2) для резервуаров с r/H =1,11, гибкость λ=h/t_{экв}=330..350;

3) для резервуаров с r/H =1,27, гибкость λ=h/t_{экв}=230..275.

Верхняя граница диапазона ограничена требованием обеспечением максимального КЗУ (пункт 3.4), а нижняя экономической целесообразности (пункт 3.5). Для промежуточные значений г/Н гибкость первого участка допустимо определять интерполяцией. Гибкость остальных участков принимается согласно зависимости полученной в пункте 3.2.3.

3.7 Сравнение с результатами других авторов

Кроме приведенного в пункте 3.3 сравнения рекомендуемой методики с нормативными документами, имеет смысл рассмотреть результаты аналогичных исследований. Наиболее близкой по содержанию и форме представления результатов работой является статья [30]. Как отмечено в пункте 1.2.2, авторами указанной статьи получены уточнения к методике расположения колец жесткости приведенной в нормативном документе США – АРІ [4]. Так для резервуара диаметром 40 метров оптимальная высота неподкреплённой оболочки должна составлять 0,8 от высоты полученной по методике АРІ [4].

Для резервуаров рассматриваемых в данном исследовании, диаметр 40 метров соответствует резервуару объёмом 20000 м³. Для такого резервуара требуемая высота неподкреплённой оболочки, вычисленная согласно API, приведена в пункте 3.1 и равна 4,7 метра. Высота первого, наиболее короткого, участка согласно методике с использованием выражения (4) равна 4,4 метра. Таким образом, отношение рациональной и нормативной высоты равно 0,94, что на 17,5% отличается от результатов полученных авторами работы [30].

Данное отличие, в первую очередь, вызвано отсутствием дифференцирования шага колец в зависимостях предложенных в [30]. Также авторами не оговорено учитывалось ли фактическое снижение требуемой толщины стенки резервуара при постановке колец и наличие других нагрузок кроме ветровой. Важно отметить, что требуемая жёсткость самих колец отличается в нормативных документах США и РФ, что могло отразиться на полученных результатах. Тем не менее, в обоих исследованиях рекомендуется снижать высоту неподкреплённой оболочки, в зоне верхних поясов, для резервуаров диаметром от 30 до 50 метров. Дальнейший учёт дополнительных факторов, а также модельный эксперимент позволят уточнить оба предложенных подхода.

4. Заключение

В результате проведённых исследований получены следующие результаты:

- Через введённое понятие гибкости (λ =h/t_{экв}) определено соотношение λ между участками, которое следует обеспечивать при расположении горизонтальных колец жёсткости. При таком расположении КЗУ стенки оказывается максимальным для соответствующего количества колец.
- 2. При сравнение с наиболее распространёнными нормативными документами Евросоюза, США и РФ КЗУ оказался выше на 2-5% по сравнению с наиболее выгодным нормируемым расположением.
- 3. Исходя и условий обеспечения максимального КЗУ и экономической целесообразности, определены численные значения гибкостей, которые необходимо обеспечить при расположении колец. Для уточнения значения требуемой гибкости получено выражение, учитывающее габариты резервуаров, в диапазоне r/H от 0,79 до 1,27 с высотой до 18 м и действующую скорость ветра - до 50 м/с.
- 4. Полученные данные позволяют определить рациональное количество и шаг колец жёсткости для наиболее распространённых типоразмеров резервуаров.

Литература

- [1]. СТО-СА-03-002-2009 Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М.: Ростехэкспертиза, 2009. 205 с.
- [2]. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. М.: Стандартинформ, 2016. 91 с.
- [3]. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.
- [4]. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage. Eleventh edition. Washington, D. C.: API Publishing Services, 2011. 449 p.
- [5]. EN 1993-1-6. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1–6: Strength and stability of shell structures.
- [6]. EN 1993-4-2. Eurocode 3: Design of steel structures Part 4–2: Tanks.
- [7]. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures –Part 1–4: General actions Wind actions.
- [8]. Макаров А.А., Митрова Т.А., Кулагин В.А. Долгосрочный прогноз развития энергетики мира и

References

- [1]. STO-SA-03-002-2009 Pravila proyektirovaniya, izgotovleniya i montazha vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov dlya nefti i nefteproduktov [Rules for the design, manufacture and installation of vertical cylindrical tanks for petroleum and petroleum products]. Moscow: Rostekhekspertiza, 2009. 205 p. (rus)
- [2]. GOST 31385-2016 Rezervuary vertikalnyye tsilindricheskiye stalnyye dlya nefti i nefteproduktov [Vertical cylindrical steel tanks for petroleum and petroleum products]. Moscow: Standartinform, 2016. 91 p. (rus)
- [3]. Set of Rules 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and effects]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85*. (rus)
- [4]. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage. Eleventh edition. Washington, D. C. : API Publishing Services, 2011. 449 p.
- [5]. EN 1993-1-6. Eurocode 3: Design of steel structures- Part 1–6: Strength and stability of shell structures.
- [6]. EN 1993-4-2. Eurocode 3: Design of steel structures Part 4–2. Tanks.
- [7]. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-4:

Tcepliaev, M., Mushchanov, V. Ensuring the stability of the walls of the tanks based on the rational arrangement of the stiffening rings. Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 9(72). Pp. 58-73. DOI: 10.18720/CUBS.72.4

России // Экономический журнал ВШЭ, №2, 2012. С. 172-204.

- [9]. Типовой проект 704-1-170.84. Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 10 000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. М.: ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. 46 с.
- [10]. Типовой проект 704-1-171.84. Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. М.: ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. 46 с.
- [11]. Типовой проект 704-1-172.84. Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 30 000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. М.: ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. 46 с.
- [12]. Степанов Р.Н., Роменский Д.И., Мущанов В.Ф., Зубенко А.В., Цепляев М.Н. Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар // Науковедение. 2017. №6(9). С. 10-23.
- [13]. Ивченко, Ю. В. Особенности поведения вертикальных цилиндрических резервуаров при ветровой нагрузке // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2012. № 11. С. 27–30.
- [14]. Егоров Е. А., Федоряка Ю.В. Исследование вопросов устойчивости стальных вертикальных цилиндрических резервуаров // Металлические конструкции. 2006. №1(9). С. 89-97.
- [15]. Егоров Е. А., Дмитренко К.И. Устойчивость вертикальных стальных резервуаров с кольцевыми ребрами жесткости // Строительство, материаловедение, машиностроение. 2013. №69. С. 182-186.
- [16]. Цепляев М.Н. Моделирование реальной эпюры ветрового давления на цилиндрический резервуар в среде SCAD // Металлические конструкции. 2016. №4(22). С. 183-192.
- [17]. Мущанов В.Ф., Цепляев М.Н. Сравнительный анализ эффективности конструктивных и расчетных методов обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров // Металлические конструкции. 2017. №3(23). С. 123-137.
- [18]. Мущанов В.Ф., Цепляев М.Н. Анализ численных и аналитических значений коэффициента запаса устойчивости стенки резервуара. Вестник ДонНАСА. 2018. №3(131). С. 105-115.
- [19]. Городецкий Д. А., Барабаш М. С., Водопьянов Р. Ю. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013. М.: Электронное издание, 2013. 376 с.
- [20]. Mushchanov Volodymyr, Zubenko Ganna, Moskalenko Ivan. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface // Metal Constructions. 2013. No. 3(19). Pp. 173–182.
- [21]. Lemak D., Studnicka J. Influence of Ring Stiffeners on a Steel Cylindrical Shell // Acta Polytechnica. 2005. No. 1(45). Pp. 56-63.
- [22]. Mehdi Jahangiri, M.H. Fakhrabadi, Milad Jahangiri. Computational Buckling Analysis of Wind Loaded Cylindrical Storage Tanks // Majlesi Journal of Energy Management. 2012. No. 4(1). Pp. 23-31.
- [23]. Chrysanthos Maraveas, Georgios A. Balokas, Konstantinos D. Tsavdaridis. Numerical evaluation on

General actions - Wind actions.

- [8]. Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagin V.A. Dolgosrochnyy prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii [Long-term forecast of energy development in the world and Russia] // Ekonomicheskiy zhurnal VShE, No 2, 2012. Pp. 172-204. (rus)
- [9]. Tipovoy proyekt 704-1-170.84. Rezervuar stalnoy vertikalnyy tsilindricheskiy dlya nefti i nefteproduktov yemkostyu 10 000 kub. m. Albom I. Rabochiye chertezhi KM rezervuara [Standard project of oil tank]. Moscow: TsNIIproyektstalkonstruktsiya Gosstroya SSSR, 1972. 46 p. (rus)
- [10]. Tipovoy proyekt 704-1-171.84. Rezervuar stalnoy vertikalnyy tsilindricheskiy dlya nefti i nefteproduktov yemkostyu 20 000 kub. m. Albom I. Rabochiye chertezhi KM rezervuara [Standard project of oil tank]. Moscow: TsNIIproyektstalkonstruktsiya Gosstroya SSSR, 1972. 46 p. (rus)
- [11]. Tipovoy proyekt 704-1-172.84. Rezervuar stalnoy vertikalnyy tsilindricheskiy dlya nefti i nefteproduktov yemkostyu 30 000 kub. m. Albom I. Rabochiye chertezhi KM rezervuara [Standard project of oil tank]. Moscow: TsNIIproyektstalkonstruktsiya Gosstroya SSSR, 1972. 46 s.
- [12]. Stepanov R.N., Romenskiy D.I., Mushchanov V.F., Zubenko A.V., Tseplyayev M.N. Vetrovaya nagruzka na vertikalnyy tsilindricheskiy rezervuar [Wind load on a vertical cylindrical tank] // Naukovedeniye. 2017. No 6(9). Pp. 10-23.
- [13]. Ivchenko, Yu. V. Osobennosti povedeniya vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov pri vetrovoy nagruzke [Behavior of vertical cylindrical tanks under wind load] // Visnik Pridniprovskoï derzhavnoï akademiï budivnitstva ta arkhitekturi. 2012. No 11. Pp. 27–30.
- [14]. Yegorov Ye. A., Fedoryaka Yu.V. Issledovaniye voprosov ustoychivosti stalnykh vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov [Study of the stability of steel vertical cylindrical tanks] // Metallicheskiye konstruktsii. 2006. No 1(9). Pp. 89-97.
- [15]. Yegorov Ye. A., Dmitrenko K.I. Ustoychivost vertikalnykh stalnykh rezervuarov s koltsevymi rebrami zhestkosti [Stability of vertical steel tanks with annular stiffeners] // Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye. 2013. No 69. Pp. 182-186.
- [16]. Tseplyayev M.N. Modelirovaniye realnoy epyury vetrovogo davleniya na tsilindricheskiy rezervuar v srede SCAD [Modeling of real loading diagrams of wind pressure on cylindrical tank using SCAD software] // Metallicheskiye konstruktsii. 2016. No 4(22). Pp. 183-192.
- [17]. Mushchanov V.F., Tseplyayev M.N. Sravnitelnyy analiz effektivnosti konstruktivnykh i raschetnykh metodov obespecheniya ustoychivosti stenok vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov [Comparative analysis of the effectiveness of constructive and design methods for ensuring the stability of the walls of vertical cylindrical tanks]// Metallicheskiye konstruktsii. 2017. No 3(23). Pp. 123-137.
- [18]. Mushchanov V.F., Tseplyayev M.N. Analiz chislennykh i analiticheskikh znacheniy koeffitsiyenta zapasa ustoychivosti stenki rezervuara [Analysis of numerical and analytical values of the tank wall stability factor]. Vestnik DonNASA. 2018. No 3(131). Pp. 105-115.
- [19]. Gorodetskiy D. A., Barabash M. S., Vodopyanov R. Yu. Programmnyy kompleks LIRA-SAPR 2013 [Software package tutorial]. Moscow: Elektronnoye izdaniye, 2013. 376 p.
- [20]. Mushchanov Volodymyr, Zubenko Ganna, Moskalenko Ivan. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface // Metal Constructions. 2013. No. 3(19). Pp. 173– 182.
- [21]. Lemak D., Studnicka J. Influence of Ring Stiffeners on a Steel Cylindrical Shell // Acta Polytechnica. 2005. No. 1(45). Pp. 56-63.
- [22]. Mehdi Jahangiri, M.H. Fakhrabadi, Milad Jahangiri. Computational Buckling Analysis of Wind Loaded Cylindrical Storage Tanks // Majlesi Journal of Energy Management. 2012.

Цепляев М.Н., Мущанов В.Ф. Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жёсткости // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 9(72). С. 58-73. DOI: 10.18720/CUBS.72.4

shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current American and European design codes // Thin-Walled Structures. 2015. No. 1(95). Pp. 152-160.

- [24]. Carlos A. Burgos, Rossana C. Jaca, Jorge L. Lassig, Luis A. Godoy. Wind buckling of tanks with conical roof considering shielding by another tank // Thin-Walled Structures. 2014. No.1 (84). Pp. 226-240.
- [25]. Luis A. Godoy. Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks // Structural Engineering and Mechanics. 2012. No. 5(13). Pp. 1-9.
- [26]. Y. Zhu, J.H. Dong, B.J. Gao. Buckling Analysis of Thin Walled Cylinder with Combination of Large and Small Stiffening Rings under External Pressure // Procedia Engineering. 2015. No. 1(130). Pp. 364-373.
- [27]. Российский климат стал еще суровее [Электронный ресурс]. URL: http://andrometa.ru/ rossijskij-klimat-stalesche-surovee.html (дата обращения: 08.09.2018).
- [28]. J.G. Teng, J.M. Rotter. Buckling of Thin Metal Shells. London: CRC Press, 2003. 520 p.
- [29]. L.A. Samuelson (Editor), S.F. Eggwertz. Shell Stability Handbook 1st Edition. London: CRC Press, 1992. 300 p.
- [30]. Fan Bu, Caifu Qian. A rational design approach of intermediate wind girders on large storage tanks // Thin-Walled Structures. 2015. No.1 (92). Pp. 76-81.

Контактная информация

- 1.* +38(050)2535342, m.n.cepliaev@donnasa.ru (Цепляев Максим Николаевич, ассистент)
- 2. +380503680804, volodymyr.mushchanov@mail.ru (Мущанов Владимир Филиппович, д.т.н., профессор)

No. 4(1). Pp. 23-31.

- [23]. Chrysanthos Maraveas, Georgios A. Balokas, Konstantinos D. Tsavdaridis. Numerical evaluation on shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current American and European design codes // Thin-Walled Structures. 2015. No. 1(95). Pp. 152-160.
- [24]. Carlos A. Burgos, Rossana C. Jaca, Jorge L. Lassig, Luis A. Godoy. Wind buckling of tanks with conical roof considering shielding by another tank // Thin-Walled Structures. 2014. No.1 (84). Pp. 226-240.
- [25]. Luis A. Godoy. Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks // Structural Engineering and Mechanics. 2012. No. 5(13). Pp. 1-9.
- [26]. Y. Zhu, J.H. Dong, B.J. Gao. Buckling Analysis of Thin Walled Cylinder with Combination of Large and Small Stiffening Rings under External Pressure // Procedia Engineering. 2015. No. 1(130). Pp. 364-373.
- [27]. Rossiyskiy klimat stal yeshche suroveye [Online]. URL: http://andrometa.ru/ rossijskij-klimat-stal-esche-surovee.html (reference date: 08.09.2018).
- [28]. J.G. Teng, J.M. Rotter. Buckling of Thin Metal Shells. London: CRC Press, 2003. 520 p.
- [29]. L.A. Samuelson (Editor), S.F. Eggwertz. Shell Stability Handbook 1st Edition. London: CRC Press, 1992. 300 p.
- [30]. Fan Bu, Caifu Qian. A rational design approach of intermediate wind girders on large storage tanks // Thin-Walled Structures. 2015. No.1 (92). Pp. 76-81.

Contact information

- 1.* +38(050)2535342, m.n.cepliaev@donnasa.ru (Tcepliaev Maxim, Assistant)
- 2. +380503680804, volodymyr.mushchanov@mail.ru (Mushchanov Volodymyr, Doctor of Engineering)

© Цепляев М.Н., Мущанов В.Ф., 2018