



(24)-0413-1

УСИЛИВАЮЩИЙ ЭФФЕКТ ЛЕСТНИЦ ДЛЯ РЕЗЕРВУАРОВ С ПЛАВАЮЩЕЙ КРОВЛЕЙ ПРИ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Владимир Филиппович Мушчанов¹, Максим Николаевич Цепляев²,
Анна Васильевна Зубенко³

^{1,2,3} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

¹mvf@donnasa.ru, ²m.n.ceplyaev@donnasa.ru, ³a.v.zubenko@donnasa.ru

Аннотация. Статья рассматривает важную проблему безопасной эксплуатации и надёжности вертикальных цилиндрических резервуаров с плавающей кровлей. В разрезе вопроса обеспечения устойчивости рассмотрены два аспекта этой проблемы: уточнение ветровой нагрузки в случае нетиповой расчётной ситуации и использование технологического оборудования, как усиливающего элемента. В качестве усиления рассмотрены винтовые лестницы для обслуживания кровли. При помощи компьютерного моделирования получены уточнённые значения аэродинамического коэффициента, учитывающая реальное распределение ветра в группе резервуаров. Максимальное расхождение в отдельных точках от нормативных данных составило 20 %. С использованием метода конечных элементов, выполнена оценка устойчивости стенки резервуаров в зависимости от варьируемых параметров лестниц. Для исследуемых резервуаров объёмом от 10 до 30 тыс. м³ обоснована возможность использовать лестницы как элемент, повышающий устойчивость. В отдельных случаях, отмечено повышение сопротивления потере устойчивости на 34 %. Определён рекомендуемый наклон лестниц в диапазоне 29...38°.

Ключевые слова: устойчивость, резервуар, метод конечных элементов, цилиндрическая оболочка, ветер, аэродинамические коэффициенты, лестница

Для цитирования: Мушчанов В. Ф., Цепляев М. Н., Зубенко А. В. Усиливающий эффект лестниц для резервуаров с плавающей кровлей при ветровых воздействиях // *Металлические конструкции*. 2024. Т. 30, № 4. С. 161–172. doi: 10.71536/mc.2024.v30n4.1. edn: hbxrek.

Original article

REINFORCING EFFECT OF LADDERS FOR TANKS WITH FLOATING ROOFS IN CASE OF WIND INFLUENCES

Vladimir F. Mushchanov¹, Maxim N. Tseplyaev², Anna V. Zubenko³

^{1,2,3} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹mvf@donnasa.ru, ²m.n.ceplyaev@donnasa.ru, ³a.v.zubenko@donnasa.ru

Abstract. The article considers an important problem of safe operation and reliability of vertical cylindrical tanks with floating roof. In the context of the issue of ensuring stability, two aspects of the problem are considered: clarifying the wind load in the case of an atypical design situation and using technological equipment as a reinforcing element. Spiral staircases for roof maintenance are considered as reinforcement. Refined values of the aerodynamic coefficient were obtained using computer modeling. They take into account the actual wind distribution in a group of tanks. The maximum discrepancy in hotel locations from the regulatory data was 20 %. Using the finite element method, the stability of the tank wall was assessed depending on the varying parameters of the ladders. For the studied tanks with a volume of 10 to 30



thousand m³, the possibility of using ladders as an element that increases stability is justified. In some cases, there was a 34 % increase in resistance to loss of stability. The recommended slope of the stairs has been determined in the range of 29...38°.

Keywords: stability, tank, finite element method, cylindrical shell, wind, aerodynamic coefficients, staircase

For citation: Mushchanov V. F., Tseplyaev M. N., Zubenko A. V. Reinforcing effect of ladders for tanks with floating roofs in case of wind influences. *Metal Constructions*. 2024;30(4):161–172. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2024.v30n4.1. edn: hbxrek.

Введение

Резервуары для хранения широко используются на многих промышленных предприятиях, особенно в отрасли переработки. Существенное многообразие типов резервуаров обусловлено требованиями технологичности, безопасности, охраны окружающей среды и экономической эффективности. В текущем исследовании рассмотрен достаточно распространённый тип – вертикальные цилиндрические резервуары (ВЦР) с плавающей кровлей и открытым верхом – рисунок 1, а, объёмом от 10 до 30 тыс. м³. Главное предназначение и преимущество плавающей кровли – это уменьшение потерь продукта от испарения и, следовательно, снижение загрязнения воздуха. Обязательной составляющей всех типов таких конструкций является технологическая лестница – рис. 1, б.

Несмотря на преимущества, отсутствие жёсткой стационарной кровли приводит к повышенной деформативности стенки и требует особого внимания к учёту реального распределения ветровой нагрузки и конструктивным методам повышения устойчивости. Это подтверждается случаями реальных аварий резервуаров, как в случае возведения (рис. 2, а) [1], так и в процессе эксплуатации (рис. 2 б, в) [2; 3]. Потеря устойчивости не всегда приводит к полному разрушению конструкции. В то же время, даже локальные деформации делают невозможным эксплуатацию резервуаров, в том числе подъём-спуск плавающего покрытия. Восстановление геометрии металла делает его более хрупким и склонным к образованию усталостных трещин [4], что приводит к необходимости полной замены повреждённого резервуара.

В такой ситуации, применение конструктивных методов повышения устойчивости является важной частью обеспечения надёжности резервуаров. К дополнительным элементам, повышающим устойчивость стенок резервуаров, можно отнести кольцевые рёбра жёсткости [5–9], технологические лестницы (рис. 1, б) и другие конструкции. Учёт взаимодействия лестниц со стенкой не рассматривается в инженерных методиках. С учётом тенденции детализированного учёта особенностей работы конструкций, изучение этого вопроса является актуальным и может выявить скрытые резервы несущей способности. С учётом необходимости повышения экономичности конструкций, в текущей работе, рассматривается вопрос усиления резервуаров технологическими лестницами (рис. 1, б).

Анализ исследований и публикаций

Теоретические исследования [10–12] показывают положительное влияние лестниц на общую устойчивость резервуаров. В работе [11] обоснована возможность повышения жёсткости стенки для резервуаров со стационарной кровлей. Аэродинамические испытания на модели [12] подтвердили полученные результаты для резервуаров со стационарным покрытием. В то же время, характер работы резервуаров без стационарного покрытия имеет существенные отличия и требует дополнительных исследований.

Важным вопросом является сложность распределения ветрового давления, для резервуаров с открытым верхом. Особенно для случаев группового расположения. Ветровые нагрузки и аэродинамические характеристики круглых

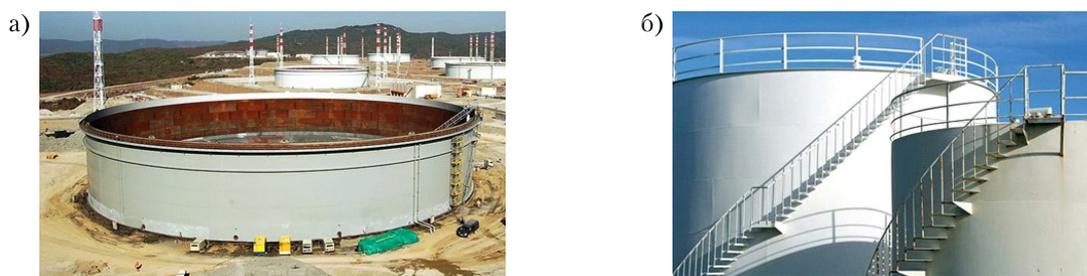


Рисунок 1. Вертикальные цилиндрические резервуары: а) общий вид; б) технологические лестницы.



Рисунок 2. Аварии резервуаров без стационарной кровли.

цилиндрических конструкций, являются темой работ многих исследователей (например, Макдональд [14], Уэмацу [15; 16], и др. [17; 18]). Распределение давления ветра вокруг цилиндрической оболочки было тщательно изучено с помощью испытаний в аэродинамической трубе в работах [19; 20], где было собрано значительное количество экспериментальных данных. Давление ветра изменяется как по высоте, так и по окружности цилиндрической оболочки. Экспериментальные измерения окружного распределения давления ветра на круговой конструкции, в нормативной литературе, обоснованно аппроксимированы гармоническим косинусным рядом Фурье. Анализ работ показывает, что усреднённые значения динамических сил ветра, полученные измерением давления как на внешней, так и на внутренней поверхностях цилиндров с открытым верхом в турбулентных пограничных слоях, изучены поверхностно. Что приводит к фактическим отличиям для отдельных нетиповых расчётных ситуаций (нахождение в группе, разное положение плавающей кровли).

Следовательно, **объектом исследования** является устойчивость тонкостенных оболочек с

усиливающими элементами под действием неравномерной нагрузки.

Цель исследования

Изучение участия в сопротивлении потере устойчивости технологических лестниц резервуаров с плавающими кровлями, с учётом уточнённой ветровой нагрузки.

Основными задачами приняты следующие:

- изучение распределения ветрового потока для группы резервуаров с открытым верхом;
- исследование устойчивости резервуара с открытым верхом, при вариативных параметрах технологических лестниц.

Основная часть

Распределение ветрового потока для различных вариантов расположения резервуара

Представлены результаты, полученные при проведении численного исследования в программе SolidWorks Flow Simulation по распределению ветрового давления для одного ВЦР с открытым верхом (рис. 3). Подробные характеристики

и детали численной модели приведены в работе [21]. Один из вариантов расчётной модели приведен на рисунке на рис. 3, а. Распределение аэродинамического коэффициента на уровне 17 метров для резервуара диаметром 39 м и с высотой стенки 18 метров приведено на рис. 3, б. В качестве нормативного распределения принято распределение коэффициента C_e из Еврокода. Форма распределения ветрового потока анализировалась в двух вариантах:

- нормативная (Еврокод);
- уточнённое распределение ветрового потока для резервуара с лестницей (по результатам расчётов в SolidWorks Flow Simulation).

Максимальные отличия ветровой нагрузки от нормативной отмечены в зонах отрицательного давления.

Второй рассматриваемый случай изучает распределение ветрового потока в группе из четырех пустых резервуаров с плавающей кровлей. Полученные схемы продувки представлены на рисунках 4 и 5.

Отсутствие кровли резервуара существенно влияет на характер обтекания. Ветровые потоки создают зоны низкого давления и вихри вокруг резервуара. Эти зоны могут привести к колебаниям и нагрузкам на конструкцию, что важно учитывать при проектировании. Резервуары

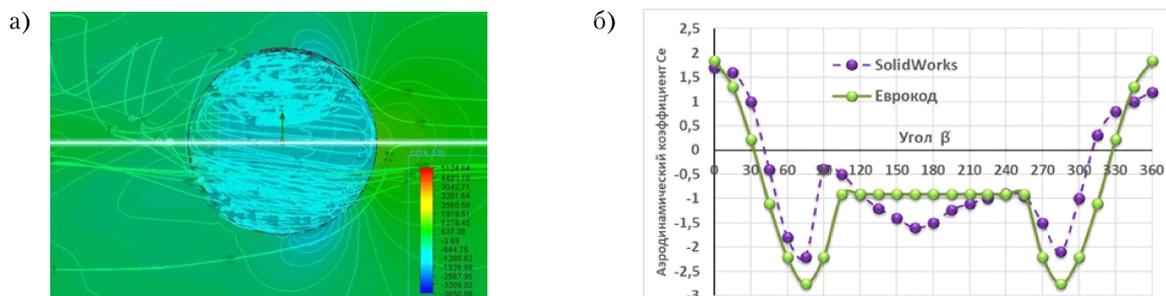


Рисунок 3. Ветровая нагрузка для ВЦР 20 тыс. м³ с открытым верхом: а) расчётная схема в Solid Works; б) аэродинамический коэффициент.

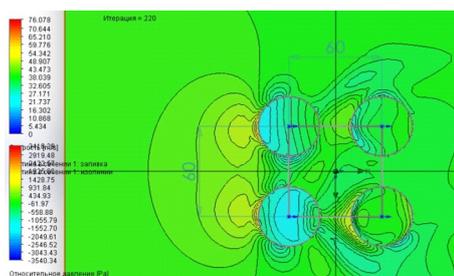


Рисунок 4. Распределение ветрового давления для группы резервуаров с открытым верхом.

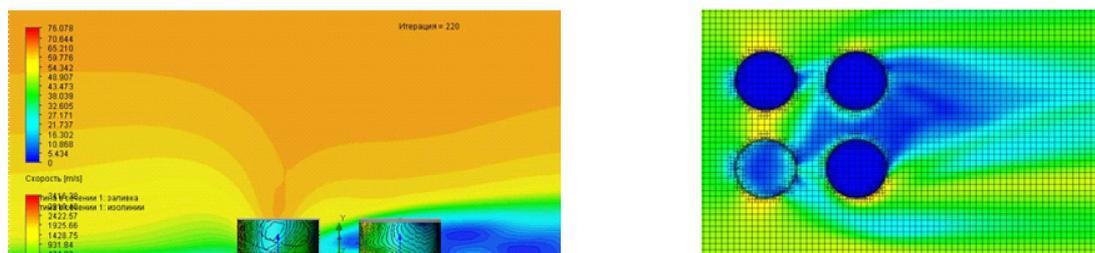


Рисунок 5. Плотность потока для группы резервуаров с открытым верхом: а) вид слева; б) вид сверху.

с более гладкой и обтекаемой формой демонстрируют меньшие значения сопротивления ветра, в частности в сравнении с работой [21]. Необходимо учитывать эти параметры для оценки надежности резервуара в различных условиях.

Полученные данные изменения аэродинамического коэффициента позволили определить следующие особенности для рассматриваемых конструкций:

- максимальное расхождение с нормативными значениями (до 20 %) отмечено в зонах отрицательного давления (отрывающее воздействие на стенку);
- в зоне активного давления возникает снижение вакуумметрического давления в зависимости от типоразмера до 6 %;

Поскольку полученные данные показывают отличие от нормативных подходов, расчёт устойчивости, проведённый далее, учитывал указанные параметры.

Устойчивость резервуара с открытым верхом, с учётом включения в работу технологических лестниц

Множество вариаций расположения и конструктива винтовых лестниц открывает широкий круг

научных и практических вопросов, требующих более глубокого изучения. Жёсткость лестниц стоит рассматривать в разрезе требований к усиливающим кольцам. В частности, согласно требованиям стандартов должно быть обеспечено условие устойчивости в своей плоскости. Допустимое смещение сечения под действием ветра не должно превышать до 2 % от радиуса. На основе опыта исследований [11] рассмотрен тип лестницы 1 (рис. 6, а), поскольку тип 2 (рис. 6, б) не работает единым контуром со стенкой.

Рассматривался случай пустого резервуара, на который действует только ветровая нагрузка величиной 0,5 кПа. В этом случае понтон находится на дне резервуара и не участвует в обеспечении устойчивости стенки. Полный перечень исследуемых вариантов в таблице 1.

Для выполнения расчётов применялся программный комплекс LIRA-SAPR. Дискретизация элементов выполнялась на основе обеспечения сходимости аналитической и численных напряжений от гидростатической нагрузки. Другие параметры модели учитывают рекомендации работ [5; 11]. Ветровая нагрузка прикладывалась с учётом действия максимального сжимающего

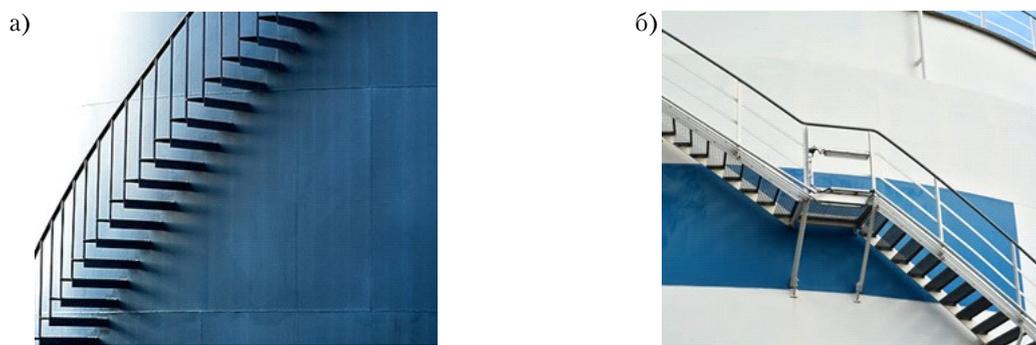


Рисунок 6. Технологическая винтовая лестница резервуара: а) вариант 1; б) вариант 2.

Таблица 1. Размеры рассматриваемых моделей резервуара

№	Объём ВЦР, м ³	Высота стенки Н, м	Радиус R, м	Наклон лестницы, α°	Ширина лестницы, l мм	Нагрузка
1	10 000	12 и 18	14.25	от 30° до 50° с шагом 5°	900	Ветер 500 Па на пустой резервуар
2	20 000		20			
3	30 000		22.3			

давления на сторону с лестницей. Точная форма ветровой нагрузки моделировалась в LIRA-SAPR через текстовый файл. Общий вид и отдельные элементы конечно-элементной модели одного из рассматриваемых вариантов приведены на рис. 7.

Основным сравнительным параметром принято значение коэффициента запаса устойчивости цилиндрической стенки (КЗУ) (формула 1).

$$КЗУ = \frac{P_{кр}}{P} \quad (1)$$

где $P_{кр}$ – критическое давление потери устойчивости цилиндрической стенки, P – действующее давление.

Для оценки эффективности рассматриваемого типа усиления, предварительно выполнен расчёт для резервуаров без лестницы. Общий вид деформированной схемы и формы потери устойчивости приведён на рисунке 8.

Учёт влияния жёсткости лестницы выполнен для всех указанных в таблице 1 вариантов. Графические результаты расчётов отдельных вариантов приведены ниже. Деформированная схема на рис. 9 а–в, формы потери устойчивости на рис. 9 г–е.

Репрезентативные значения результатов расчёта параметра устойчивости для различных вариантов расположения лестниц в таблице 2.

На основе полученного массива данных, построены зависимости изменения КЗУ от наклона лестницы для резервуаров с открытым верхом – рис. 10.

Отмечено, что лестница оказывает незначительное влияние на общее напряженно-деформированное состояние оболочки под действием ветра. Зафиксировано минимальные возмущения осевых и снижение кольцевых (до 20 %) напряжений в зоне крепления лестниц. Приведенные графики позволили определить характерные

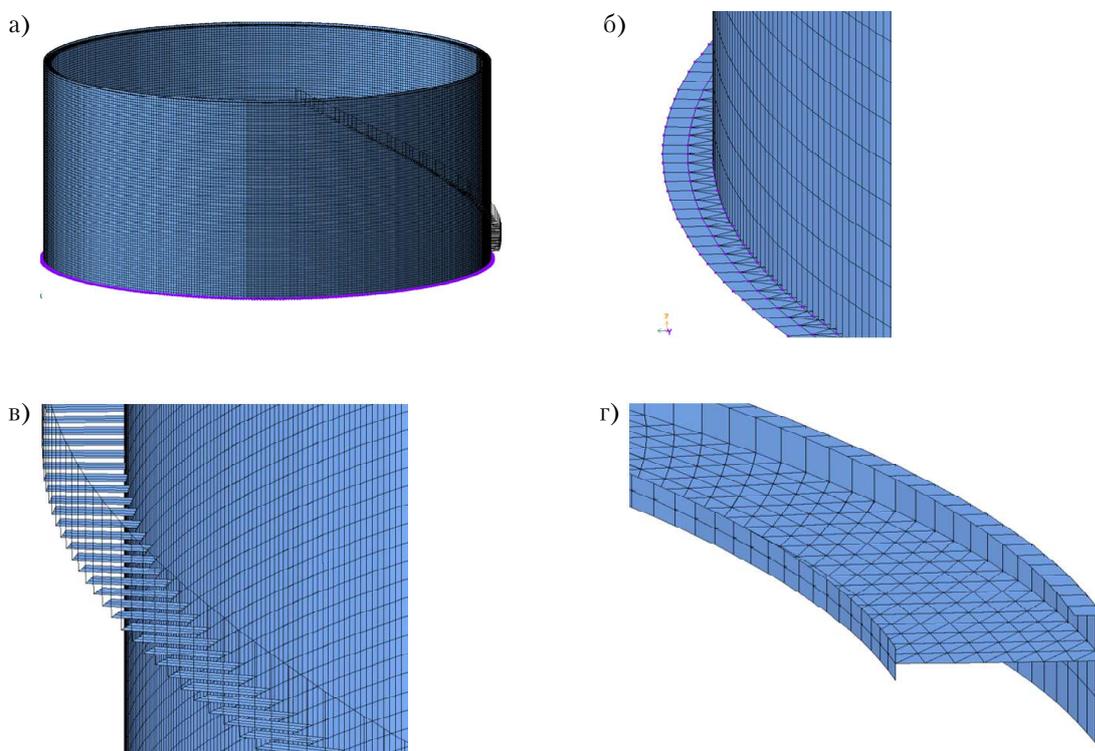


Рисунок 7. Программная модель резервуара: а) общий вид модели; б) крайка дна; в) лестница; г) фрагмент верхнего кольца.

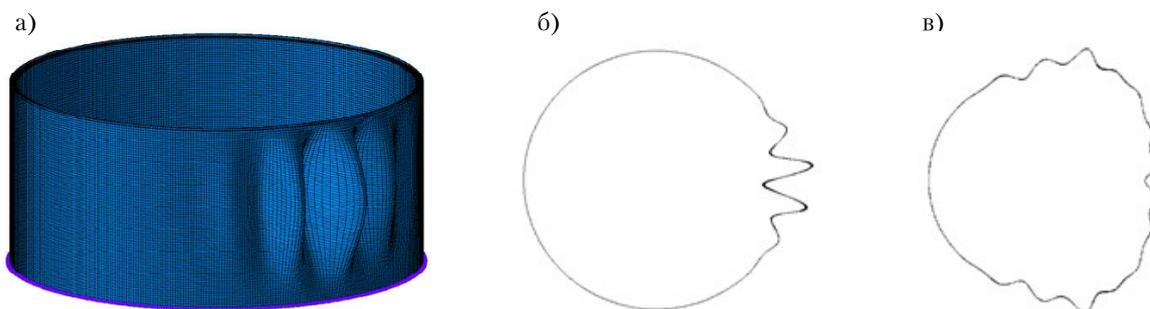


Рисунок 8. Деформативность резервуара без усиления: а) общий вид потери устойчивости; б) потеря устойчивости стенки; в) деформации стенки.

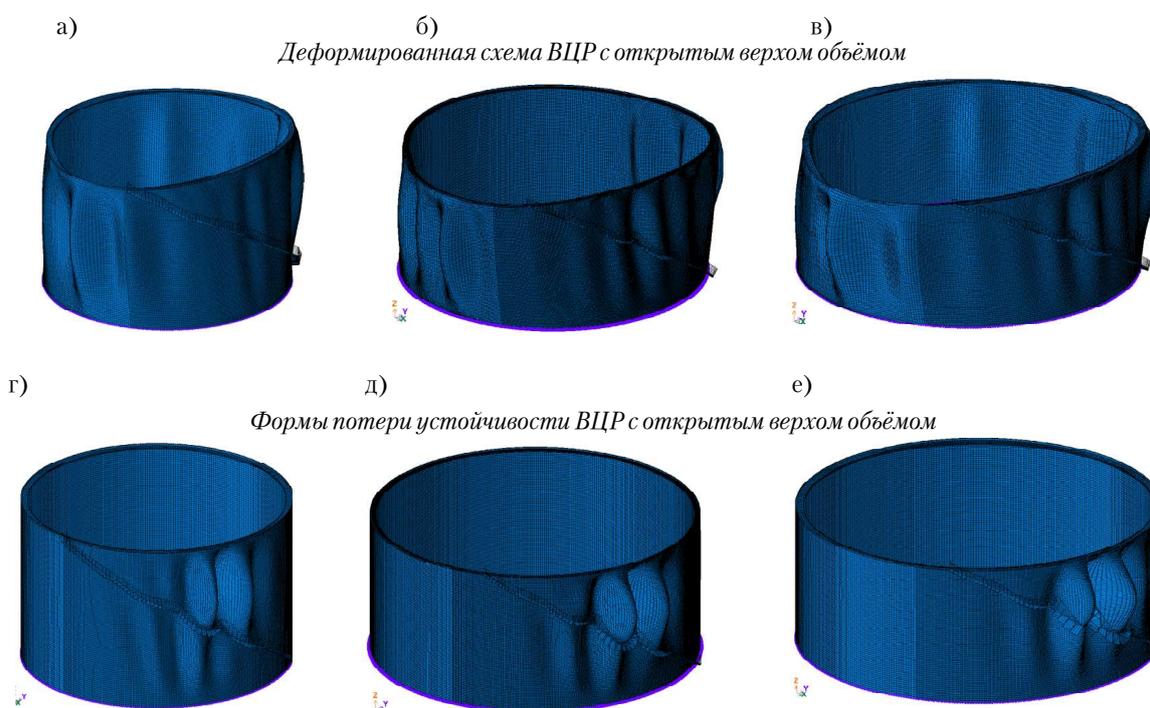


Рисунок 9. Деформации и форма потери устойчивости расчётных моделей с учётом наличия лестницы: а) 10 тыс. м³; б) 20 тыс. м³; в) 30 тыс. м³; г) 10 тыс. м³; д) 20 тыс. м³; е) 30 тыс. м³.

Таблица 2. Количественный анализ зависимостей

№	V резервуара, тыс. м ³	Значение КЗУ, для КЭ модели без лестницы	Предельное повышение КЗУ при моделировании лестницы, %	Повышение КЗУ при уменьшении угла наклона лестницы с 49° до 30°, %
1	10	1.24	34.2	16
2	20	1.32	30.02	11.2
3	30	1.49	27.1	10.4

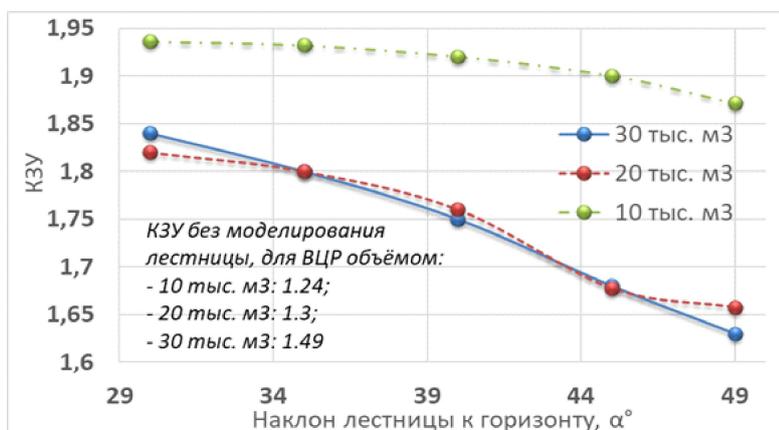


Рисунок 10. Устойчивость стенки резервуара, в зависимости от уклона лестницы.

для всех рассмотренных объёмов резервуаров особенности:

- диапазон значений КЗУ в зависимости от уклона лестницы меняется на величину до 16 %;
- с увеличением угла α разница между значениями КЗУ для рассмотренных конструктивных вариантов лестниц снижается;
- зависимости КЗУ от угла α близки к линейным в диапазонах угла $\alpha = 25...45^\circ$;
- более резкое снижение КЗУ отмечено для резервуаров объёмом 20 и 30 тыс. м³ для углов $\alpha > 40^\circ$.

На основании полученных результатов сформулированы выводы о допустимости применения лестниц в качестве элементов, повышающих устойчивость для резервуаров с открытым верхом.

Выводы

Резервуары с открытым верхом существенно больше подвержены риску потери устойчивости стенки от действия ветра, по сравнению с вариантами со стационарной кровлей. В среднем снижение коэффициента запаса устойчивости, от действия ветровой нагрузки, составляет 30 %. Вопросам устойчивости стенок такого типа ВЦР должно быть уделено особое внимание.

С использованием экспериментальных исследований и цифровой модели в SolidWorks были получены уточненная эпюра ветровой нагрузки для резервуаров с открытым верхом. Рассмотрены варианты одиноко стоящей конструкции и расположение в группе из четырёх резервуаров.

Наибольшие отличия зафиксированы в зонах отрывающего воздействия, и верхнем поясе одиночно расположенного резервуара (в отдельных точках до 40 % по сравнению с данными стандарта). Отмечены отличающиеся срывы ветрового потока, не нашедшие своё отражение в нормативных документах. Такие эффекты могут вызывать колебания стенки, и требуют дополнительных расчетов для обеспечения устойчивости конструкции.

На основе численных исследований, с учётом в программе LIRA-SAPR проверена возможность методика определено фактическое влияние наличия винтовых лестниц на устойчивость стенок резервуаров диаметром до 50 м и объёмом до 30 тыс. м³ с плавающей кровлей. Конкретные выводы следующие:

- диапазон значений КЗУ в зависимости от уклона лестницы меняется на величину до 16 %;
- учёт наличия винтовой лестницы повышает критические напряжения потери устойчивости стенки (в зоне активного давления ветра) на 27...34 % в зависимости от её уклона;
- для конструктивного варианта лестницы № 1, с точки зрения повышения устойчивости стенки резервуара, рекомендуемым углом наклона лестницы α принят диапазон $29...38^\circ$.

Лестницы значительно повышают устойчивость стенки резервуара. Однако эффект повышения устойчивости от лестниц имеет смысл в случае ориентации лестниц в направлении максимального сжимающего ветрового воздействия. Учёт лестниц требует прогнозируемое направление

ветрового воздействия. В то же время, их учёт позволяет расширить перечень методов усиления стенок резервуаров и определить реальные резервы конструкций. Малый вес и обязатель-

ность применения винтовых лестниц позволяет считать их перспективным методом повышения устойчивости стенок ВЦР как при новом проектировании, так и реконструкции.

Список источников

1. Jaca, R. C. Wind buckling of metal tanks during their construction / R. C. Jaca, L. A. Godoy. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2010. – Volume 48(6). – P. 453–459. – DOI: 10.1016/j.tws.2010.01.001. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823110000121> (дата обращения: 01.11.2024).
2. Batista-Abreu, J. C. Thermal Buckling Behavior of Open Cylindrical Oil Storage Tanks under Fire / J. C. Batista-Abreu, L. A. Godoy. – Текст : электронный // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. – 2011. – Volume 27(1). – P. 89–97. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000309> (дата обращения: 01.11.2024).
3. De Paor, C. Buckling of thin-walled cylinders : experimental and numerical investigation / C. De Paor. – Текст : электронный // *The Boolean*. – 2010. – P. 47–52. – DOI:10.33178/boolean.2010.11. – URL: <https://journals.ucc.ie/index.php/boolean/article/view/boolean-2010-11> (дата обращения: 01.11.2024).
4. Землянский, А. А. Опыт выявления дефектов и трещин в крупногабаритных резервуарах для хранения углеводородов / А. А. Землянский, О. С. Вертынский. – Текст : электронный // *Magazine of Civil Engineering*. – 2011. – № 7. – С. 40–44. – URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7\(25\)/zemlyanskiy_rezervuary.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7(25)/zemlyanskiy_rezervuary.pdf) (дата обращения: 01.11.2024).
5. Цепляев, М. Н. Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жёсткости / М. О. Цепляев, В. Ф. Мущанов. – Текст : электронный // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2018. – № 9(72). – С. 58–73. – DOI: 10.18720/CUBS.72.4 (дата обращения: 01.11.2024).
6. Zeybek, O. Strength and stiffness requirements for intermediate ring stiffeners on discretely supported cylindrical shells / O. Zeybek, C. Topkaya, J. M. Rotter. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2015. – Volume 96(3). – P. 64–74. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823110000121>

References

1. Jaca, R. C.; Godoy, L. A. Wind buckling of metal tanks during their construction. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2010. – Volume 48(6). – P. 453–459. – DOI: 10.1016/j.tws.2010.01.001. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823110000121> (date of access: 01.11.2024).
2. Batista-Rey, J. C.; Godoy, L. A. Thermal Buckling Behavior of Open Cylindrical Oil Storage Tank under Fire. – Text : electronic. – In: *Journal of Performance of Constructed Facilities*. – 2011. – Volume 27(1). – P. 89–97. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000309> (date of access: 01.11.2024).
3. De Paor, C. Buckling of thin-walled cylinders: experimental and numerical investigation. – Text : electronic. – In: *The Boolean*. – 2010. – P. 47–52. – DOI:10.33178/boolean.2010.11. – URL: <https://journals.ucc.ie/index.php/Boolean/article/view/boolean-2010-11> (date of access: 01.11.2024).
4. Zemlyansky, A. A., Vertynsky, O. S. The experience of detecting defects and cracks in large-size hydrocarbon storage tanks. – Text : electronic. – In: *Magazine of Civil Engineering*. – 2011. – № 7. – P. 40–44. – URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7\(25\)/zemlyanskiy_rezervuary.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7(25)/zemlyanskiy_rezervuary.pdf) (date of access: 01.11.2024). (in Russian)
5. Tseplyaev, M. N.; Muschanov, V. F. Ensuring the stability of tank walls based on the rational arrangement of stiffness rings. – Text : electronic. – In: *Construction of unique buildings and structures*. – 2018. – № 9(72). – P. 58–73. – DOI: 10.18720/CUBS.72.4 (date of access: 01.11.2024). (in Russian)
6. Zeybek, O.; Topkaya, C.; Rotter, J. M. Strength and stiffness requirements for intermediate ring stiffeners on discretely supported cylindrical shells. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2015. – Volume 96(3). – P. 64–74. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823110000121> (date of access: 01.11.2024).
7. Sun, T.; Azzuni, E.; Guzey, S. Stability of Open-Topped Storage Tanks with Top Stiffener and One

- www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823115300586 (дата обращения: 01.11.2024).
7. Sun, T. Stability of Open-Topped Storage Tanks with Top Stiffener and One Intermediate Stiffener Subject to Wind Loading / T. Sun, E. Azzuni, S. Guzey. – Текст : электронный // *Journal of Pressure Vessel Technology*. – 2018. – Volume 140(1). – 011204 (14 p.). – DOI: 10.1115/1.4038723. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/pressurevesseltech/article-abstract/140/1/011204/449482/Stability-of-Open-Topped-Storage-Tanks-With-Top> (дата обращения: 01.11.2024).
 8. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures: State-of-the-Art Review / H. Pasternak, Z. Li, A. Juozapaitis, A. Daniūnas. – Текст : электронный // *Applied Sciences*. – 2022. – № 12(22). – 11665. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/22/11665> (дата обращения: 01.11.2024).
 9. Uematsu, Y. Effects of wind girders on the buckling of open-topped storage tanks under quasi-static wind loading / Y. Uematsu, T. Yamaguchi, J. Yasunaga. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2018. – Volume 124. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.044. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823117308492> (дата обращения: 01.11.2024).
 10. Stability of Petroleum Storage Tanks considering the effect of Helical Stair Beams / M. A. Hussien, S. Y. A. Nagag, A. Maged, M. M. Korashy. – Текст : электронный // *International Journal of Research in Engineering and Management*. – 2020. – Volume 4, № 1. – P. 24–35. – URL: <http://www.crdeepjournal.org/wp-content/uploads/2020/08/Vol-4-1-3-IJREM-compressed.pdf> (дата обращения: 01.11.2024).
 11. Tank shell stability: refined design schemes / M. N. Tseplichaev, V. F. Mushchanov, A. V. Zubenko [et al.]. – Текст : электронный // *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – № 119(3). – Article no. 11906. – 16 p. – DOI: 10.34910/MCE.119.6. – URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2023.119.6> (дата обращения: 01.11.2024).
 12. Deformation behavior of reinforced shells under the action of wind: an experimental study / V. Mushchanov, M. Tseplichaev, A. Mushchanov, A. Orzhehovskiy. – Текст : электронный // *Architecture and Engineering*. – 2024. – Volume 9, № 2. – P. 65–78. – DOI: 10.23968/2500-0055-2024-9-2-65-78. – URL: <https://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/1190> (дата обращения: 01.11.2024).
 13. Comparative analysis on buckling behavior of steel cylindrical tanks by consideration of more realistic numerical models / A. R. Shokrzadeh, F. Mansuri, M. Asadi, M. R. Sohrabi. – Текст : электронный // *5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'20)*, October 2020. – № 159. – 8 p. – DOI: 10.11159/icsect20.159. – URL: https://avestia.com/CSEE2020_Proceedings/files/paper/ICSECT/ICSECT_159.pdf (дата обращения: 01.11.2024).
 - Intermediate Stiffener Subject to Wind Loading – Text : electronic. – In: *Journal of Pressure Vessel Technology*. – 2018. – Volume 140(1). – 011204 (14 p.). – DOI: 10.1115/1.4038723. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/pressurevesseltech/article-abstract/140/1/011204/449482/Stability-of-Open-Topped-Storage-Tanks-With-Top> (date of access: 01.11.2024).
 8. Pasternak, H.; Li, Z.; Juozapaitis, A.; Daniūnas, A. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures: State-of-the-Art Review – Text : electronic. – In: *Applied Sciences*. – 2022. – № 12(22). – 11665. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/22/11665> (date of access: 01.11.2024)
 9. Uematsu, Y.; Yamaguchi, T.; Yasunaga, J. Effects of wind riders on the buckling of open-topped storage tanks under quasistatic wind loading. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2018. – Volume 124. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.044. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823117308492> (date of access: 01.11.2024).
 10. Hussien, M. A.; Hatag, S. Y. A.; Maged, A.; Korashy, M. M. Stability of Petroleum Storage Tanks considering the effect of Helical Stair Beams. – Text : electronic. – In: *International Journal of Research in Engineering and Management*. – 2020. – Volume 4, № 1. – P. 24–35. – URL: <http://www.crdeepjournal.org/wp-content/uploads/2020/08/Vol-4-1-3-IJREM-compressed.pdf> (date of access: 01.11.2024).
 11. Tseplichaev, M.; Mushchanov, V.; Zubenko, A. [et al.]. Tank shell stability: refined design schemes. – Text : electronic. – In: *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – № 119(3). – Article no. 11906. – DOI: 10.34910/MCE.119.6. – URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2023.119.6> (date of access: 01.11.2024).
 12. Mushchanov, V.; Tseplichaev, M.; Mushchanov, A.; Orzhehovskiy, A. Deformation behavior of reinforced shells under the action of wind: an experimental study. – Text: electronic. – In: *Architecture and Engineering*. – 2024. – Volume 9, № 2. – P. 65–78. – DOI: 10.23968/2500-0055-2024-9-2-65-78. – URL: <https://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/1190> (date of access: 01.11.2024).
 13. Shokrzadeh, A. R.; Mansuri, F.; Asadi, M.; Sohrabi, M. R. Comparative analysis on buckling behavior of steel cylindrical tanks by consideration of more realistic numerical models. – Text : electronic. – In: *5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'20)*, October 2020. – № 159. – DOI: 10.11159/icsect20.159. – URL: https://avestia.com/CSEE2020_Proceedings/files/paper/ICSECT/ICSECT_159.pdf (date of access: 11.01.2024).
 14. Macdonald, P. A.; Kwok, K. C. S.; Holmes, J. D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures. – Text : electronic. – In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1988. – Volume 31. – P. 165–187. – DOI: 10.1016/0167-6105(88)90003-7. – URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/0167-6105\(88\)90003-7](https://www.sci-hub.ru/10.1016/0167-6105(88)90003-7)

14. Macdonald, P. A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures / P. A. Macdonald, K. C. S. Kwok, J. D. Holmes. – Текст : электронный // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1988. – Volume 31. – P. 165–187. – DOI: 10.1016/0167-6105(88)90003-7. – URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/0167-6105\(88\)90003-7?ysclid=m3jprjlwla200883556](https://www.sci-hub.ru/10.1016/0167-6105(88)90003-7?ysclid=m3jprjlwla200883556) (дата обращения: 01.11.2024).
15. Uematsu, Y. Aerodynamic forces on circular cylinders of finite height / Y. Uematsu, M. Yamada, M. Ishii. – Текст : электронный // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1994. – Volume 51. – P. 249–265. – DOI: 10.1016/0167-6105(94)90007-8. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167610594900078> (дата обращения: 01.11.2024).
16. Uematsu, Y. Deflection and buckling behavior of thin, circular cylindrical shells under wind loads / Y. Uematsu, K. Uchiyama. – Текст : электронный // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1985. – Volume 18. – P. 245–261. – DOI: 10.1016/0167-6105(85)90084-4. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167610585900844> (дата обращения: 01.11.2024).
17. Горохов, Е. В. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения / Е. В. Горохов, С. Г. Кузнецов. – Донецк : [б. и.], 2009. – 168 с. – Текст : непосредственный.
18. Кинаш, Р. И. Исследование аэродинамических параметров системы из двух круговых цилиндров / Р. И. Кинаш, А. Е. Копылов. – Текст : непосредственный // *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. – 2007. – Випуск 2007-6(68) Баштові споруди. – С. 32–40.
19. Holroyd, R. J. On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds : (Part 1) / R. J. Holroyd. – Текст : непосредственный // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1983. – Volume 12. – P. 329–352.
20. Hort, M. C. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks / M. C. Hort, A. G. Robbins. – Текст : непосредственный // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2002. – Volume 90. – P. 1321–1348.
21. Мушчанов, В. Ф. Численное моделирование ветрового давления на поверхности вертикального цилиндрического резервуара / В. Ф. Мушчанов, А. В. Зубенко, И. В. Москаленко. – Текст : электронный // *Металлические конструкции*. – 2013. – Том 19, № 3. – С. 173–181. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2013-3/05_Mushchanov_Zubenko_Moskalenko.pdf (дата обращения: 01.11.2024). – ISSN 1993-3517.
- 7?ysclid=m3jprjlwla200883556 (date of access: 01.11.2024).
15. Uematsu, Y.; Yamada, M.; Ishii, M. Aerodynamic forces on circular cylinders of finite height. – Text : electronic. – In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1994. – Volume 51. – P. 249–265. – DOI: 10.1016/0167-6105(94)90007-8. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167610594900078> (date of access: 01.11.2024).
16. Uematsu, Y.; Uchiyama, K. Deflection and buckling behavior of thin, circular cylindrical shells under wind loads. – Text:electronic. – In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1985. – Volume 18. – P. 245–261. – DOI: 10.1016/0167-6105(85)90084-4. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167610585900844> (date of access: 01.11.2024).
17. Gorokhov, Ye. V.; Kuznetsov, S. G. Experimental methods of determining wind loads on buildings and structures. – Donetsk : [s. n.], 2009. – 168 p. (in Russian)
18. Kinash, R. I.; Kopylov, A. E. Investigation of the aerodynamic parameters of a system of two circular cylinders. – Text : direct. – In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2007. – Issue 2007-6(68) Tower structures. – P. 32–40. (in Russian)
19. Holroyd, R. J. On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds : (Part 1). – Text : direct. – In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1983. – Volume 12. – P. 329–352.
20. Hort, M. C.; Robbins, A. G. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks. – Text : direct. – In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2002. – Volume 90. – P. 1321–1348.
21. Mushchanov, V. F.; Zubenko, A. V.; Moskalenko, I. V. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2013. – Volume 19, № 3. – P. 173–181. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2013-3/05_Mushchanov_Zubenko_Moskalenko.pdf (date of access: 01.11.2024). – ISSN 1993-3517.

Информация об авторах

Мущанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины и Украинской академии наук, член-корреспондент академии архитектуры Украины. Заслуженный строитель ДНР. Научные интересы: теория надёжности, расчёт, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Цепляев Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: расчёт и проектирование вертикальных цилиндрических резервуаров повышение эффективности методик расчёта оболочек на устойчивость.

Зубенко Анна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, численные методы расчета тонких оболочек положительной гауссовой кривизны.

Information about the authors

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

Tsepliaev Maxim N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of Theoretical and Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: calculation and design of vertical cylindrical tanks, increasing the efficiency of shell calculation methods for stability.

Zubenko Anna V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: study of the impact of wind loads on structures with a circular cylindrical surface, numerical methods for calculating thin shells of positive Gaussian curvature.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 19.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 19.12.2024; accepted for publication 23.12.2024.