



(24)-0406-1

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОВИСАЮЩИХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Игорь Викторович Роменский¹, Андрей Николаевич Миронов²,
Дмитрий Игоревич Мех³

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

¹ i.v.romenskii@donnasa.ru, ² a.n.myronov@donnasa.ru, ³ meh.d.i-pgs-72b@donnasa.ru

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию конструкций покрытий типовых вертикальных цилиндрических резервуаров. Предложено использовать вместо традиционных купольных покрытий провисающие тонколистовые мембранные оболочки. Это позволяет значительно уменьшить металлоемкость, как покрытия, так и резервуара в целом. Определены оптимальные параметры мембранных покрытий для типовых резервуаров объёмов 10, 20, 30, 50 тысяч кубических метров, имеющих соответственно диаметры 28,5; 39,9; 45,6; 60,7 метров. Учтена нагрузка для всех снеговых районов России, меняющаяся в пределах 0,5...4 кПа. Рассмотрено влияние избыточного давления паров нефтепродуктов, на напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов провисающих мембранных покрытий. Опасным аварийным результатом избыточного давления может быть так называемый «обратный выхлоп» покрытия. Для предотвращения этого явления и стабилизации мембранного покрытия предложено использовать центральную стойку в виде трубы или систему оттяжек. Исследовано влияние стабилизирующих элементов на напряженно-деформированное состояние и технико-экономические показатели мембранных покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров. Определены границы рационального применения предложенных способов стабилизации.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический резервуар, мембранное покрытие, напряженно-деформированное состояние, стабилизация, оптимальные параметры

Для цитирования: Роменский И. В., Миронов А. Н., Мех Д. И. Стабилизация провисающих мембранных покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления // *Металлические конструкции*. 2024. Т. 30, № 2. С. 59–74. doi: 10.71536/mc.2024.v30n2.2. edn: lxucmx.

Original article

STABILIZATION OF SAGGING MEMBRANE COVERINGS OF VERTICAL LOW PRESSURE CYLINDRICAL TANKS

Igor V. Romensky¹, Andrey N. Mironov², Dmitriy I. Mekh³

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

¹ i.v.romenskii@donnasa.ru, ² a.n.myronov@donnasa.ru, ³ meh.d.i-pgs-72b@donnasa.ru

Abstract. The article is devoted to the improvement of the design of coatings for typical vertical cylindrical tanks. It is proposed to use sagging thin-sheet membrane shells instead of traditional dome coatings. This allows to significantly reduce the metal consumption of both the coating and the tank as a whole. The optimal parameters of membrane coatings for typical tanks with volumes of 10, 20, 30, 50 thousand cubic meters, having diameters of 28.5; 39.9; 45.6; 60.7 meters, respectively, are determined. The load for all snow



regions of Russia, varying within 0.5...4 kPa, is taken into account. The effect of excess pressure of petroleum vapors on the stress-strain state of structural elements of sagging membrane coatings is considered. A dangerous emergency result of excess pressure can be the so-called «reverse exhaust» of the coating. To prevent this phenomenon and stabilize the membrane coating, it is proposed to use a central post in the form of a pipe or a system of braces. The influence of stabilizing elements on the stress-strain state and technical and economic indicators of membrane coatings of vertical cylindrical tanks is investigated. The boundaries of rational application of the proposed stabilization methods are determined.

Keywords: vertical cylindrical tank, membrane coating, stress-strain state, stabilization, optimal parameters

For citation: Romensky I. V., Mironov A. N., Mekh D. I. Stabilization of sagging membrane coverings of vertical low pressure cylindrical tanks. *Metal Constructions*. 2024;30(2):59–74. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2024.v30n2.2. edn: lxucmx.

Введение

Вертикальные цилиндрические стальные резервуары (ВЦР) для хранения нефтепродуктов являются массово применяемыми важнейшими сооружениями, обеспечивающими энергетическую безопасность страны и устойчивое развитие экономики. Вопросы повышения надёжности данных сооружений и снижения их металлоёмкости является актуальной задачей. Достаточно металлоёмким конструктивным элементом резервуаров является покрытие в виде купольных систем. Использование мембранных покрытий для вертикальных цилиндрических резервуаров имеют ряд преимуществ перед другими видами покрытий благодаря значительному снижению расхода стали, удобству транспортировки и простоте монтажа. Однако при этом существенным недостатком провисающих мембранных оболочек является их высокая деформативность и даже возможность обратного выхлопа при появлении избыточного давления внутри резервуара. Это, в свою очередь, может привести к возникновению аварийных ситуаций и ущербу для окружающей среды. Решением данной проблемы является применение стабилизированных провисающих мембранных покрытий, работающих в составе вертикальных цилиндрических резервуаров.

В статье представлены результаты научных исследований, выполненных в рамках реализации научно-технической программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Повышение долговечности и

снижение стоимости технического обслуживания зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях» (Пер. № НИОКТР 123122800064-1).

Анализ исследований и публикаций

Вопросам конструктивных решений, области применения, достоинствам мембранных систем, методам расчёта посвящены работы [1–3]. Совершенствованию методов численного расчёта, повышению надёжности с учетом уточненных нагрузок и действительной работы вертикальных цилиндрических резервуаров посвящены ряд работ [4–12]. Вопросам применения мембранных оболочек с оптимальными параметрами для покрытий ВЦР и способам их стабилизации посвящены работы [13–15].

Описание объекта исследований

Объектом исследования являются стальные вертикальные цилиндрические резервуары низкого давления для хранения нефтепродуктов емкостью 10 000...50 000 куб. м (диаметром 28,5...60,7 м).

Цель работы

Совершенствование конструкций покрытия ВЦР в виде провисающих стабилизированных мембранных оболочек с оптимальными параметрами.

Основной материал

1. Конструктивные решения, методы расчета и определение оптимальных параметров покрытия.

Покрытие ВЦР в виде провисающей мембранной оболочки состоит из опорного контура (являющегося одновременно и верхним обвязочным кольцом стенки резервуара) в виде вальцованных сварных горизонтально расположенных стальных двутавров и центрального кольца мембраны в виде горизонтально расположенного стального двутавра. Опорный контур объединяется с центральным кольцом радиальными элементами «постели», выполненной из стальных листов сечением 300×4 мм и кольцевых ребер жесткости в виде швеллера номер 14, расположенных с шагом не более 6 м и что показано на рисунке 1. Поверх «постели» укладываются листы мембраны соединенные между собой и опорным контуром (рисунок 1).

Для реализации цели работы в ПК ЛИРА-САПР построены расчетные модели [15] резервуаров объемом 10, 20, 30, 50 тысяч кубических метров с двумя различными видами стабилизации покрытия (центральная стойка и канаты). В статье используются типовые проекты резервуа-

ров, а нагрузки, действующие на резервуар, приняты с учетом нормативных документов для 8 снеговых районов России [16, 17].

Предварительный подбор оптимальных параметров мембранного покрытия (толщина мембраны, размеры сечения опорного контура в виде сварного горизонтально расположенного двутавра и начальная стрела провиса оболочки) на круглом плане производился согласно методике, разработанной автором статьи [1]. Полученные параметры корректировались с учетом существующего сортамента металлопроката, технологических и конструктивных требований.

При подборе параметров покрытия и построения численных расчетных моделей резервуаров использовались следующие исходные данные:

- 1) диаметры (28,5 м ($V = 10$ тыс. куб. м); 39,9 м ($V = 20$ тыс. куб. м); 45,6 м ($V = 30$ тыс. куб. м); 60,7 м ($V = 50$ тыс. куб. м));
- 2) нагрузки от снега для снеговых районов I–VIII (0,5...4 кПа) согласно СП 20.13330.2016 [16];
- 3) технологическая нагрузка 0,24 кПа согласно СТО-СА-ОЗ-002-2009 [17];
- 4) избыточное давление от паров нефтепродуктов принимается 0,5, 1, 1,5 и 2 кПа, вакуум – 0,25 кПа.

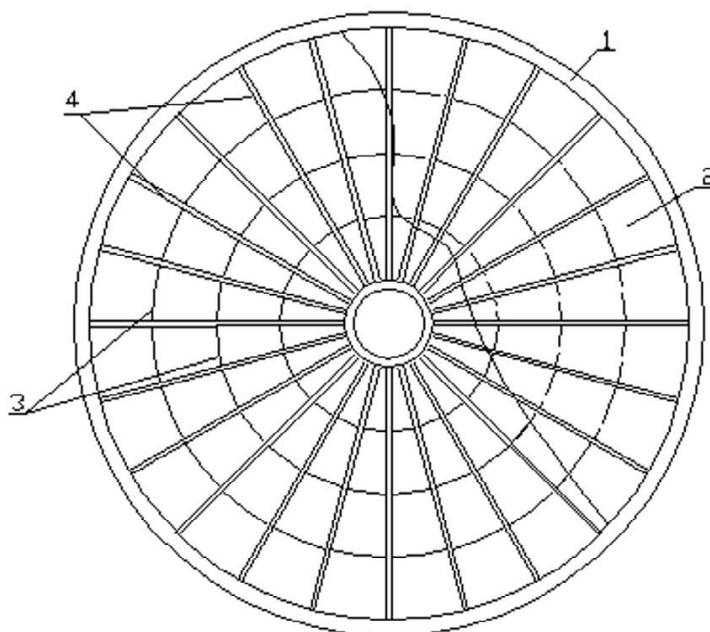


Рисунок 1. Схема мембранного покрытия резервуара: 1 – наружный опорный контур; 2 – мембрана; 3 – вспомогательные (кольцевые) элементы; 4 – основные (радиальные) направляющие элементы.

Для создания расчетной модели принимались типовые проекты ВЦР.

Максимальный шаг сетки разбиения конечных элементов мембраны и резервуара принят равным 1 м [15].

На рисунке 2 приведен пример расчетной модели резервуара, выполненной в ПК ЛИРА-САПР 2016.

Количество узлов в расчетной модели для резервуара емкостью 10 тыс. куб. м составило 3 187, емкостью 20 тыс. куб. м – 5 934, емкостью 30 тыс. куб. м – 7 638, емкостью 50 тыс. куб. м – 12 378.

Напряженно-деформированное состояние мембранного покрытия определялось для расчетных сочетаний нагрузок (РСН) приведенных в таблице 1 согласно рекомендациям [17]. При этом РСН 1-5 необходимы для определения вер-

тикальных перемещений мембраны по II предельному состоянию, а РСН 6-10 – для уточнения несущей способности мембраны и опорного контура по I предельному состоянию и при необходимости корректировки их геометрических параметров. Запас прочности опорного контура принимаем в пределах 1–2%. Коэффициенты надежности для нагрузок приняты согласно рекомендациям [16, 17]. В таблицах 2–5 приведены параметры мембранных покрытий без учета стабилизирующих элементов. Параметры покрытия получены с учетом максимальных усилий возникающих в элементах, вызванных неблагоприятными расчетными сочетаниями нагрузок.

В зависимости от величины снеговой нагрузки и избыточного давления паров нефтепродуктов определены вертикальные перемещения мембраны. Предельная величина вертикальных

Таблица 1. Расчетные сочетания и коэффициенты надежности для нагрузок, действующих на покрытие резервуара

№	Наименование нагрузки	Коэффициенты надежности по нагрузке для РСН ¹⁾									
		1	2	3	4	5	6	7 ²⁾	8 ²⁾	9 ²⁾	10 ²⁾
1	Собственный вес	1	1	1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
2	Технологическая	1	1	1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
3	Снеговая	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	Избыточное давление	0	0,5	1	1,5	2	0	1,2	1,2	1,2	1,2
5	Вакуум	0,9	0	0	0	0	1,08	0	0	0	0

Примечание: 1) «0» означает, что нагрузка не учитывается в РСН; 2) РСН 7, 8, 9, 10 учитывают соответственно избыточное давление 0,5, 1, 1,5 и 2 кПа.

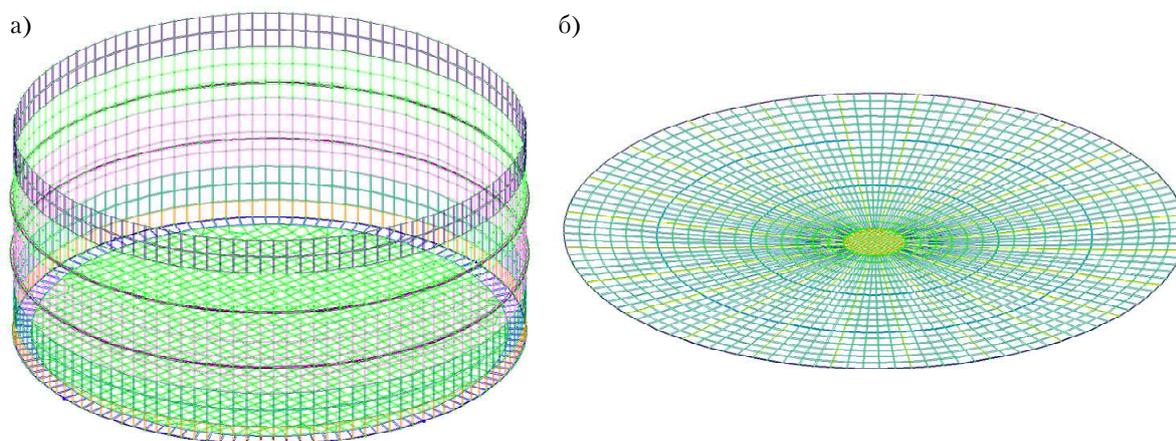


Рисунок 2. Расчетная модель резервуара емкостью 20 тыс. куб. м: а) резервуар; б) мембранное покрытие.

Таблица 2. Параметры мембранных покрытий резервуара емкостью 10 тыс. куб. м (диаметр наружного контура 28,5 м, внутреннего центрального кольца – 2,8 м)

№	Параметр	Ед. измерения	Снеговой район								
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	Толщина мембраны	мм	2	2	2	2	3	2	2	2	2
2	Высота стенки двутавра опорного контура	мм	740	740	750	780	650	700	750	700	700
3	Толщина стенки двутавра опорного контура	мм	8	8	8	8	8	8	8	8	8
4	Ширина полки двутавра опорного контура	мм	260	260	280	350	220	300	320	300	300
5	Толщина полки двутавра опорного контура	мм	14	14	14	14	12	12	14	14	12
6	Начальная стрела провиса	мм	300	300	300	300	550	550	550	550	700

Таблица 3. Параметры мембранных покрытий резервуара емкостью 20 тыс. куб. м (диаметр наружного контура 39,9 м, внутреннего центрального кольца – 4,0 м)

№	Параметр	Ед. измерения	Снеговой район								
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	Толщина мембраны	мм	2	2	2	2	2	2	2	2	3
2	Высота стенки двутавра опорного контура	мм	750	750	800	860	780	800	900	900	950
3	Толщина стенки двутавра опорного контура	мм	8	8	8	8	8	8	8	8	8
4	Ширина полки двутавра опорного контура	мм	260	260	280	360	280	330	480	480	480
5	Толщина полки двутавра опорного контура	мм	14	14	14	16	14	16	16	16	18
6	Начальная стрела провиса	мм	800	800	800	800	900	900	1 050	1 050	1 050

Таблица 4. Параметры мембранных покрытий резервуара емкостью 30 тыс. куб. м (диаметр наружного контура 45,6 м, внутреннего центрального кольца – 5,0 м)

№	Параметр	Ед. измерения	Снеговой район									
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	Толщина мембраны	мм	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
2	Высота стенки двутавра опорного контура	мм	800	800	800	860	900	1 000	1 050	1 100	1 100	1 100
3	Толщина стенки двутавра опорного контура	мм	8	8	8	10	10	10	10	10	10	10
4	Ширина полки двутавра опорного контура	мм	350	350	340	380	430	500	550	530	530	530
5	Толщина полки двутавра опорного контура	мм	14	14	16	18	18	18	20	20	20	20
6	Начальная стрела провиса	мм	1 000	1 000	1 000	1 000	1 100	1 100	1 100	1 100	1 100	1 250

Таблица 5. Параметры мембранных покрытий резервуара емкостью 50 тыс. куб. м (диаметр наружного контура 60,7 м, внутреннего центрального кольца – 6,0 м)

№	Параметр	Ед. измерения	Снеговой район									
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	Толщина мембраны	мм	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
2	Высота стенки двутавра опорного контура	мм	1 100	1 100	1 150	1 200	1 250	1 450	1 400	1 600	1 600	1 600
3	Толщина стенки двутавра опорного контура	мм	10	10	10	12	14	14	16	16	16	16
4	Ширина полки двутавра опорного контура	мм	520	520	550	580	600	700	700	800	800	800
5	Толщина полки двутавра опорного контура	мм	18	18	18	20	25	25	25	25	25	25
6	Начальная стрела провиса	мм	1 600	1 600	1 600	1 600	1 600	1 600	1 600	1 700	1 700	1 700

перемещений провисающих мембранных покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров не регламентируется нормативными документами. Однако в отличие от провиса величину обратного выхлопа в центре мембраны рекомендуется компенсировать с помощью различных методов стабилизации, исходя из технологических требований и техники безопасности. Технологическое оборудование резервуаров рекомендуется располагать ближе к центру мембранного покрытия, где вертикальные перемещения вверх от избыточного давления имеют минимальные значения. Доступ обслуживающего персонала к центру кровли обеспечивают технологические мостики. Максимальные вертикальные перемещения мембраны располагаются на расстоянии 2,5–3 м от опорного контура резервуара в радиальном направлении.

В качестве характерного примера представлена пространственная модель деформации мембранного покрытия резервуара (рисунок 3).

Анализ расчетов показал, что в I–II снеговых районах максимальные напряжения в опорном контуре и мембране возникают при действии максимального избыточного давления, а в III–VIII снеговых районах основные усилия возникают от снеговой нагрузки, что приводит к существенному увеличению сечений элементов покрытия.

При избыточном давлении 1–2 кПа необходимо применять конструкции, стабилизирующие мембранное покрытие, прежде всего от явления обратного выхлопа.

2. Стабилизация провисающих мембранных покрытий методом установки центральной стойки. Для стабилизации провисающего мембранного покрытия резервуара предлагается установить

центральную опорную стойку, которая будет воспринимать сжимающие усилия от собственного веса мембраны, технологической, снеговой нагрузки и вакуума и растягивающие усилия от избыточного давления паров нефтепродуктов. Центральная стойка выполнена из стальной трубы и объединяется с внутренним центральным кольцом покрытия. Стойка закрепляет центральную часть покрытия от вертикальных перемещений. Таким образом, явление обратного выхлопа становится невозможным, однако меняется расчетная схема покрытия, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния.

На рисунке 4 приведен пример расчетной модели резервуара с провисающим мембранным покрытием, стабилизируемым центральной стойкой.

В таблицах 6–9 представлены значения основных параметров провисающего мембранного покрытия резервуаров с центральной стойкой из стали С340.

Пример пространственной модели деформации мембранного покрытия резервуара, стабилизируемого центральной стойкой показана на рисунке 5.

Установка центральной стойки позволила перераспределить усилия в конструкции покрытия, благодаря чему уменьшились вертикальные перемещения мембраны. Закрепление центрального кольца от вертикальных перемещений обеспечило отсутствие явления обратного выхлопа оболочки.

3. Стабилизация провисающих мембранных покрытий методом установки стабилизирующих канатов.

Вместо центральной стойки для стабилизации провисающего мембранного покрытия резервуара

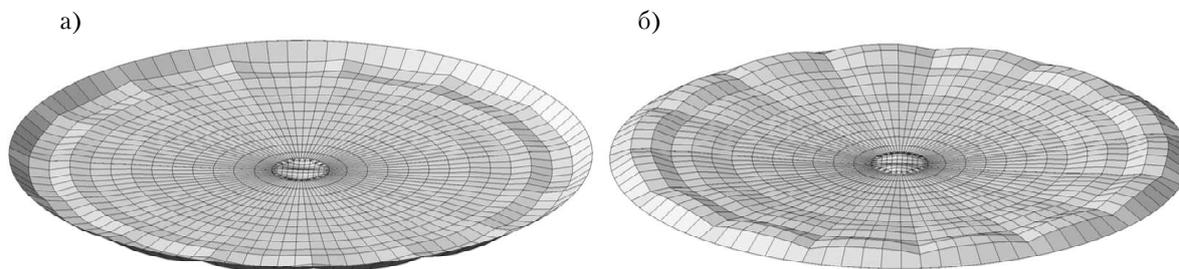


Рисунок 3. Деформация мембранного покрытия резервуара емкостью 10 тыс. куб. м: а) при наличии снеговой нагрузки и вакуума; б) при максимальном избыточном давлении.

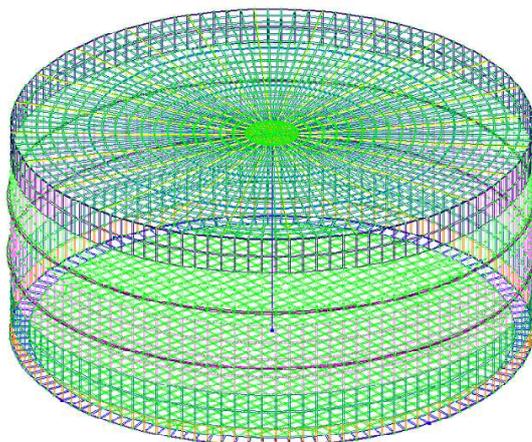


Рисунок 4. Расчетная модель с центральной стойкой на примере резервуара емкостью 20 тыс. куб. м.

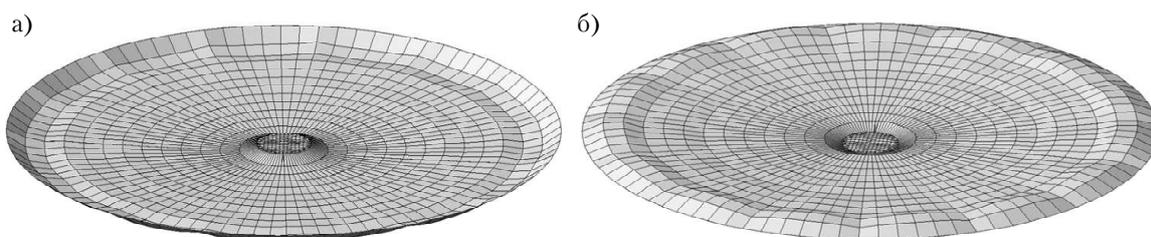


Рисунок 5. Деформация мембранного покрытия резервуара, стабилизируемого центральной стойкой, емкостью 10 тыс. куб. м: а) при наличии снеговой нагрузки и вакуума; б) при максимальном избыточном давлении.

возможно использование оттяжек в виде канатов, которые будут воспринимать растягивающие усилия от избыточного давления паров нефтепродуктов, не ограничивая вертикальные перемещения покрытия вниз. Принимаем количество канатов равным трем, которые являются стальными канатами двойной свивки с линейным касанием проволок в прядях типа ЛК-РО с металлическим сердечником МС с расчетным сопротивлением 1 370 Мпа. Канаты оснащены динамометрами для контроля проектного натяжения и крепятся сверху к центральному кольцу и снизу к специальным якорным устройствам под днищем резервуара.

На рисунке 6 приведен пример расчетной модели резервуара с провисающим мембранным покрытием, стабилизируемым системой оттяжек.

В таблицах 10–13 представлены значения основных параметров провисающего мембранного

покрытия резервуаров стабилизированных оттяжками.

Пример пространственной модели деформации мембранного покрытия резервуара, стабилизируемого оттяжками, представлен на рисунке 7.

Поскольку в I–II снеговых районах максимальные напряжения в опорном контуре и мембране возникают от избыточного давления, установка канатов позволяет снизить напряжение в опорном контуре, и соответственно уменьшить его сечение. Так как канаты работают исключительно на растягивающие нагрузки, а в III–VIII снеговых районах основные усилия возникают от снеговой нагрузки, то установка канатов не приведет к снижению напряжений в опорном контуре и мембране, хотя выполняют свою основную функцию – препятствование явлению обратного выхлопа.

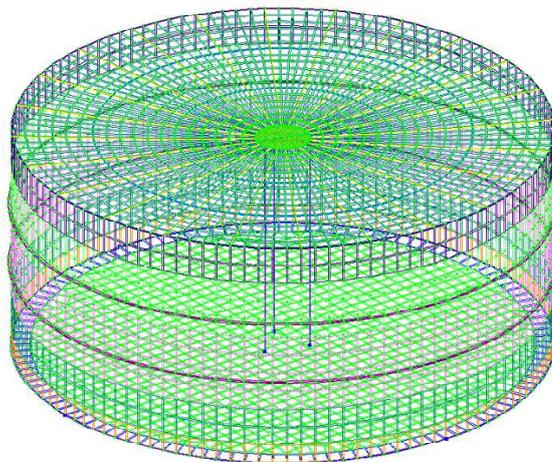


Рисунок 6. Расчетная модель со стабилизирующими оттяжками на примере резервуара емкостью 20 тыс. куб. м.

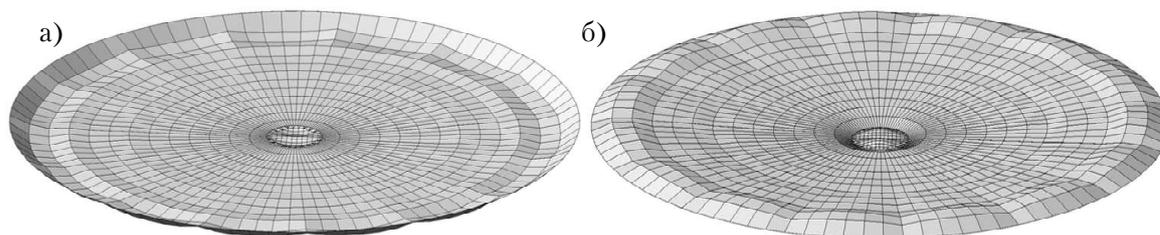


Рисунок 7. Деформация мембранного покрытия резервуара, стабилизируемого канатами, емкостью 10 тыс. куб. м: а) при наличии снеговой нагрузки и вакуума; б) при максимальном избыточном давлении.

4. Металлоемкость конструкций покрытий.

При анализе металлоёмкости покрытий без элементов стабилизации и с стабилизирующими элементами учитывался наружный опорный контур, центральное кольцо, мембрана, элементы «постели», центральная стойка и масса канатов. Покрытия, стабилизированные центральной опорой, имеют металлоемкость на 1–5 % меньше, чем покрытие без стабилизации. Аналогично применение стабилизирующих оттяжек уменьшает металлоемкость покрытия до 6 %. Разница в металлоемкости между стабилизированными и нестабилизированными мембранными покрытиями становится менее ощутимой с увеличением емкости резервуара и увеличения снеговой нагрузки.

При этом не следует забывать, что главной целью применения стабилизирующих элементов является предотвращение обратного выхлопа. Расход стали для мембранных покрытий на 40–60 % меньше чем для типовых купольных покрытий резервуаров.

Заключение

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Экономический эффект мембранных покрытий с точки зрения металлоемкости до 60 % выгоднее по сравнению с типовыми решениями купольных покрытий резервуаров.

2. Доказано, что любой из предложенных методов стабилизации с точки зрения металлоемкости будет экономически эффективнее, чем его неприменение. Металлоемкость стабилизированных покрытий уменьшается в диапазоне 1–6%. Это объясняется тем, что центральная стойка и канаты перераспределяют усилия в элементах мембранного покрытия, воспринимая часть нагрузки, уменьшая тем самым общую металлоемкость.
3. Определено, что в I и II снеговых районах определяющей нагрузкой является избыточное давление паров нефтепродуктов, в III–VIII – снеговая нагрузка, поэтому примене-

ние канатов, работающих исключительно на растягивающие усилия, рационально в резервуарах, возводимых в первых двух снеговых районах, в то время как в остальных имеет смысл применение центральной стойки.

В дальнейшем планируется исследовать влияние на напряженно-деформированное состояние и технико-экономические показатели других методов стабилизации в виде применения стабилизирующего груза, установки изгибно-жестких элементов, а также использование других типов мембранных покрытий.

Список источников

1. Андреева, Г. Н. Мембранные конструкции зданий и сооружений : в 2 частях : часть 1 : Мембранные конструкции зданий и сооружений / Г. Н. Андреева. – Москва : Стройиздат, 1990. – 450 с. – Текст : непосредственный.
2. Еремеев, П. Г. Пространственные тонколистовые металлические конструкции покрытий / П. Г. Еремеев. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 560 с. – ISBN 5-93093-483-5. – Текст : непосредственный.
3. Муцанов, В. Ф. Вероятностно-оптимальное проектирование большепролетных покрытий мембранного типа / В. Ф. Муцанов, И. В. Роменский. – Текст : непосредственный // Сборник трудов по материалам международной конференции, Макеевка, 1996. – Макеевка : [б. и.], 1996. – С. 6–9.
4. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Москва : SCAD Soft, 2011. – 709 с. – Текст : непосредственный.
5. Зубенко, А. В. Напряжения в кровле резервуара, состоящего в группе, при действии ветра / А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев, В. Ф. Муцанов. – Текст : электронный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 5(68). – С. 36–51. – DOI: 10.18720/CUBS.68.4.
6. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures / H. Pasternak, Z. Li, A. Juozapaitis, A. Daniunas. – Текст : электронный // State-of-the-Art Review. Applied Sciences. – 2022. – Volume 12, Issue 22. – P. 2–14. – DOI: 10.3390/app122211665.
7. Jing, W. Dynamic responses of oil storage tank considering wind interference effect / W. Jing, J. Wang, X. Cheng. – Текст : электронный // Engineering failure analysis. – 2019. – № 104. – P. 1053–1063. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.040.
8. Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder /

References

1. Andreeva, G. N. Membrane structures of buildings and structures : in 2 parts : Part 1 : Membrane structures of buildings and structures – Moscow : Stroyizdat, 1990. – 450 p. – Text : direct. (in Russian)
2. Eremeev, P. G. Spatial thin-sheet metal structures of coatings. Moscow : Publishing House of the Association of Construction Universities, 2006. – 560 p. – ISBN 5-93093-483-5. – Text : direct. (in Russian)
3. Muschanov, V. F.; Romensky, I. V. Probabilistically optimal design of large-span membrane-type coatings. – Text : direct. – In: *Collection of papers based on the materials of the international conference*, Makeyevka, 1996. – Makeyevka : [s. n.], 1996. – P. 6–9. (in Russian)
4. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Design models of structures and the possibility of their analysis. – Moscow : SCAD Soft, 2011. – 709 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Zubenko, V. N.; Tseplyaev, M. N.; Muschanov, V. F. Stresses in the roof of a tank consisting of a group under the action of wind. – Text : electronic. – In: *Construction of unique buildings and structures*. – 2018. – № 5(68). – P. 36–51. – DOI: 10.18720/CUBS.68.4. (in Russian)
6. Pasternak, H.; Li, Z.; Juozapaitis, A.; Daniunas, A. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures. – Text : electronic. – In: *State-of-the-Art Review. Applied Sciences*. – 2022. – Volume 12, Issue 22. – P. 2–14. – DOI: 10.3390/app122211665.
7. Jing, W.; Wang, J.; Cheng, H. Dynamic responses of oil storage tank considering wind interference effect. – Text : electronic. – In: *Engineering failure analysis*. – 2019. – № 104. – P. 1053–1063. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.040.
8. Burgos, C. A.; Batista-Abreu, J. C.; Calabro, H. D.; Godoy, L. A. Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled*

- C. A. Burgos, J. C. Batista-Abreu H. D. Calabro, R. C. Jaca, L. A. Godoy. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2015. – Volume 91. – P. 29–37. – DOI:10.1016/j.tws.2015.02.006.
9. Corrosion fatigue life prediction of crude oil storage tank via improved equivalent initial flaw size / Y. Zhang, X. Liu, J. Luo [et al.]. – Текст : непосредственный // *Theoretical and applied fracture mechanics*. – 2021. – № 114. – P. 1–12. – DOI:10.1016/j.tafmec.2021.103023.
10. Mushanov, V. Rational design solutions of ensuring the walls of tanks stability to the action of transverse loads / V. Mushanov, M. Tsepliaev. – Текст : непосредственный // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, Vladimir, Russian Federation, 27–28 April 2020 ; Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. – Vladimir : [s. n.], 2020. – Volume 896 (1). – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012024. – Текст : электронный.
11. Jing, W. Dynamic responses of liquid storage tanks caused by wind and earthquake in special environment / W. Jing, H. Feng, X. Cheng. – Текст : непосредственный // *Applied Sciences*. – 2019. – № 9. – P. 376–388.
12. Мушанов, В. Ф. Варианты конечно-элементного моделирования элементов вертикальных цилиндрических резервуаров / В. Ф. Мушанов, М. Н. Цепляев, А. В. Зубенко. – Текст : электронный // *Журнал теоретической и прикладной механики*. – 2020. – № 2(71). – С. 37–48.
13. Мушанов, В. Ф. Оптимальное проектирование мембранных покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров / В. Ф. Мушанов, И. В. Роменский, В. И. Москаленко. – Текст : непосредственный // *Новые решения конструкций, технологии сооружения и ремонта стальных резервуаров : международная научно-практическая конференция, Самара, 2007*. – Самара : [б. и.], 2007. – С. 92–100.
14. Роменский, И. В. Стабилизация провисающих мембранных покрытий, работающих в составе вертикальных цилиндрических резервуаров / И. В. Роменский, Е. В. Русакова. – Текст : непосредственный // *Металлические конструкции*. – 2008. – Том 14, № 2. – С. 97–104.
15. Мех, Д. И. Оптимизация размера конечных элементов в моделировании вертикальных цилиндрических резервуаров с мембранным покрытием в ПК ЛИРА-САПР / Д. И. Мех, И. В. Роменский, А. Н. Миронов. – Текст : непосредственный // *Инженерные исследования*. – 2024. – № 2(17). – С. 13–21. – EDN: KJGQWM.
16. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. : взамен СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85» : дата введения 2017-06-04 / исполнители ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии ФГБУ *Structures*. – 2015. – Volume 91. – P. 29–37. – DOI: 10.1016/j.tws.2015.02.006.
9. Zhang, Y.; Liu, X.; Luo, J. [et. al.]. Corrosion fatigue life prediction of crude oil storage tank via improved equivalent initial flaw size. – Text : electronic. – In: *Theoretical and applied fracture mechanics*. – 2021. – № 114. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103023.
10. Mushanov, V.; Tsepliaev, M. Rational design solutions of ensuring the walls of tanks stability to the action of transverse loads – Text : direct. – In: *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – 2020. Vladimir, Russian Federation, 27–28 April 2020 ; Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. – Vladimir : [s. n.], 2020. – Volume 896 (1). – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012024.
11. Jing, W.; Feng, H.; Cheng, X. Dynamic responses of liquid storage tanks caused by wind and earthquake in special environment. – Text : electronic. – In: *Applied Sciences*. – 2019. – № 9. – P. 376–388.
12. Muschanov, V. F.; Tseplyaev, M. N.; Zubenko, A. V. Variants of finite element modeling of elements of vertical cylindrical tanks. – Text : electronic. – In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. – 2020. – № 2(71). – P. 37–48. (in Russian)
13. Muschanov, V. F.; Romensky, I. V.; Moskalenko, V. I. Optimal design of membrane coatings of vertical cylindrical tanks. – Text : direct. – In: *New solutions for structures, technologies for the construction and repair of steel tanks* : international scientific and practical conference, Samara, 2007. – Samara : [s. n.], 2007. – P. 92–100. (in Russian)
14. Romensky, I. V.; Rusakova, E. V. Stabilization of sagging membrane coatings operating as part of vertical cylindrical tanks. – Text : electronic. – In: *Metal structures*. – 2008. – Volume 14, № 2. – P. 97–104. (in Russian)
15. Mekh, D. I.; Romensky, I. V.; Mironov, A. N. Optimization of the size of finite elements in modeling vertical cylindrical tanks with membrane coating in LIRA-CAD PC. – Text : direct. – In: *Engineering research*. – 2024. – № 2 (17). – P. 13–21. – EDN: KJGQWM. (in Russian)
16. СП 20.13330.2016. Loads and actions : approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Ministry of Construction of the Russian Federation) dated December 3, 2016 № 891/pr and put into effect on June 4, 2017 : instead of SP 20.13330.2011 «SNiP 2.01.07-85» : date of introduction 2017-06-04 / the performers of the V. A. Kucherenko Central Research Institute of Construction JSC with the participation of the Federal State Budgetary Institution «Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov». – Moscow : Standartinform, 2016. – 110 p. – Text : direct. (in Russian)
17. STO-SA-03-002-2009. Rules for the design, manufacture and installation of vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products the team of authors. – First edition ; Russian Association of

«Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 110 с. – Текст : непосредственный.

17. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов : нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр : серия 03 / коллектив авторов. – 1-е изд. ; Российская ассоциация экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности. – Москва : Ростехэкспертиза, 2009. – 216 с. – Текст : непосредственный.

Expert Organizations of technogenic high-risk objects. – Moscow : Association Rostekhexpertiza, 2009. – 216 p. (in Russian)

Информация об авторах

Роменский Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: применение оптимальных конструктивных форм металлических конструкций в гражданском и промышленном строительстве.

Миронов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций в том числе трубобетонных конструкций.

Мех Дмитрий Игоревич – магистрант Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: применение оптимальных конструктивных форм металлических конструкций в гражданском и промышленном строительстве.

Information about the authors

Romensky Igor V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: application of optimal structural forms of metal structures in civil and industrial construction.

Mironov Andrey N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Constructions and Structures, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, concentration of stresses in the nodes of trusses with the use of wide-band I-bars and gnutosvarnyh closed profiles, stress-strain state of steel reinforced concrete structures including pipe-concrete structures.

Mekh Dmitriy I. – master's student Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: application of optimal structural forms of metal structures in civil and industrial construction.

Статья поступила в редакцию 29.05.2024; одобрена после рецензирования 17.06.2024; принята к публикации 21.06.2024.

The article was submitted 29.05.2024; approved after reviewing 17.06.2024; accepted for publication 21.06.2024.