



(24)-0406-1

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОВИСАЮЩИХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Игорь Викторович Роменский<sup>1</sup>, Андрей Николаевич Миронов<sup>2</sup>,  
Дмитрий Игоревич Мех<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

<sup>1</sup> i.v.romenskii@donnasa.ru, <sup>2</sup> a.n.myronov@donnasa.ru, <sup>3</sup> 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. Romensky<sup>1</sup>, Andrey N. Mironov<sup>2</sup>, Dmitriy I. Mekh<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

<sup>1</sup> i.v.romenskii@donnasa.ru, <sup>2</sup> a.n.myronov@donnasa.ru, <sup>3</sup> 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).

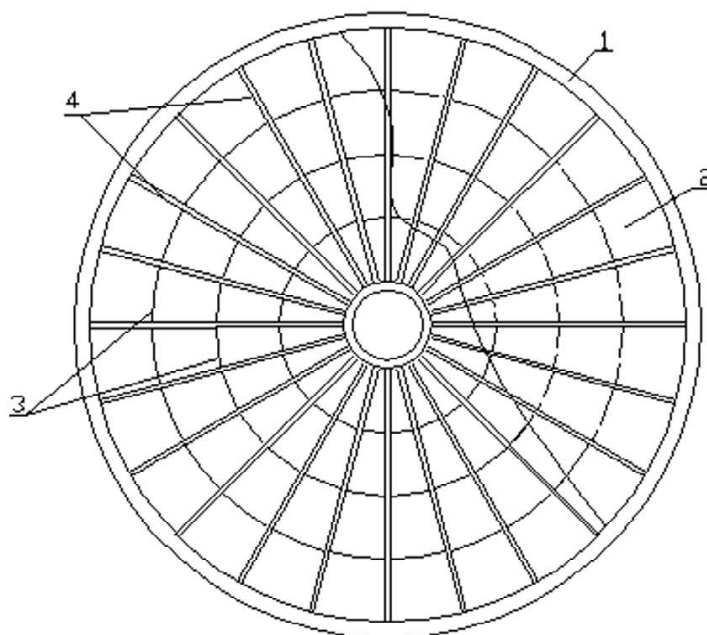
Для реализации цели работы в ПК ЛИРА-САПР построены расчетные модели [15] резервуаров объемом 10, 20, 30, 50 тысяч кубических метров с двумя различными видами стабилизации покрытия (центральная стойка и канаты). В статье используются типовые проекты резервуа-

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-

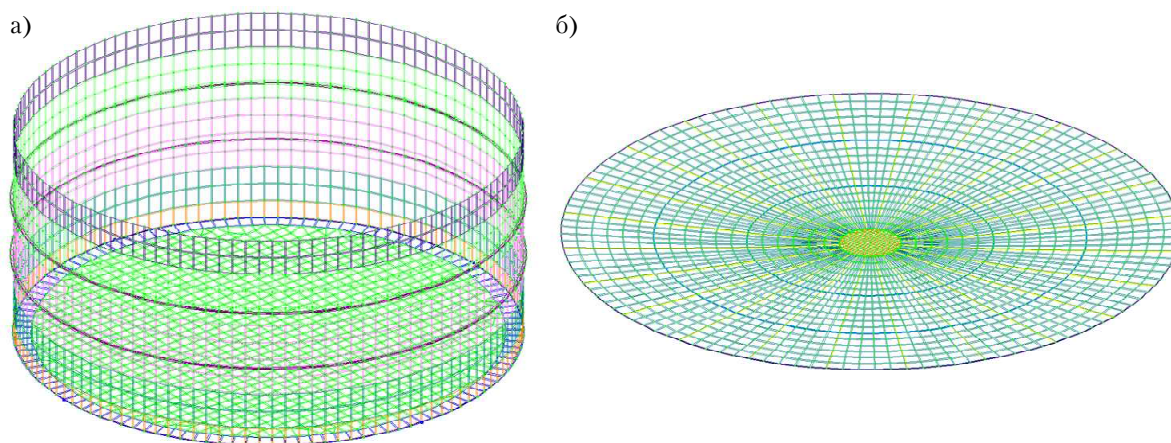
тикальных перемещений мембраны по II предельному состоянию, а РСН 6-10 – для уточнения несущей способности мембраны и опорного контура по I предельному состоянию и при необходимости корректировки их геометрических параметров. Запас прочности опорного контура принимаем в пределах 1–2%. Коэффициенты надежности 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 <sup>1)</sup>									
		1	2	3	4	5	6	7 <sup>2)</sup>	8 <sup>2)</sup>	9 <sup>2)</sup>	10 <sup>2)</sup>
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	3	2	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.

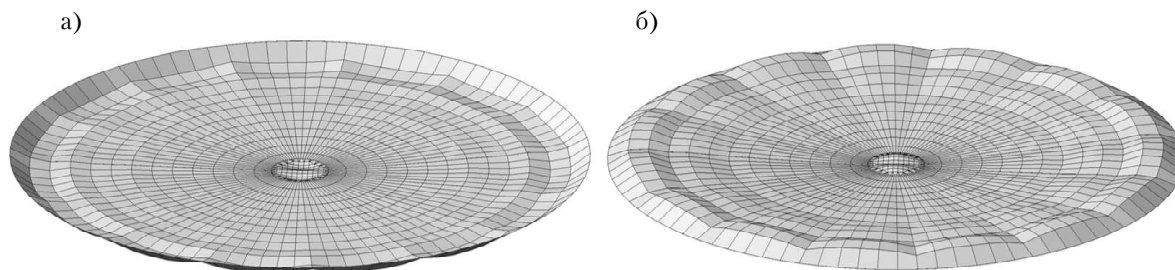
В таблицах 6–9 представлены значения основных параметров провисающего мембранного покрытия резервуаров с центральной стойкой из стали С340.

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.

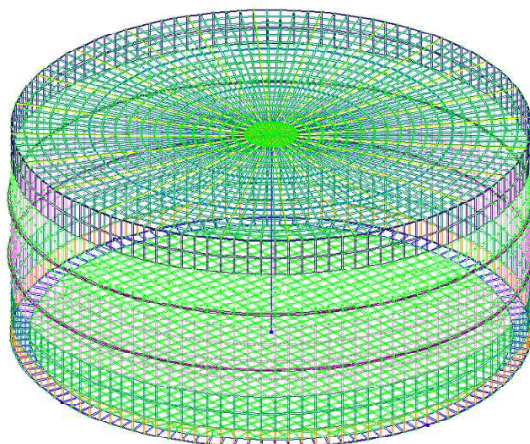
### 3. Стабилизация провисающих мембранных покрытий методом установки стабилизирующих канатов.

Вместо центральной стойки для стабилизации провисающего мембранного покрытия резервуара

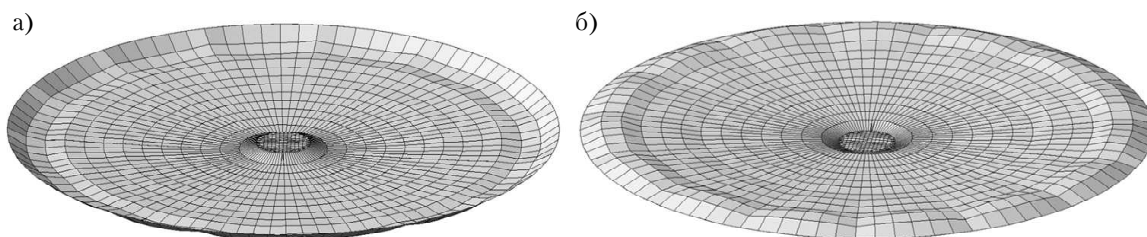


**Рисунок 3.** Деформация мембранного покрытия резервуара емкостью 10 тыс. куб. м: а) при наличии снеговой нагрузки и вакуума; б) при максимальном избыточном давлении.





**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.

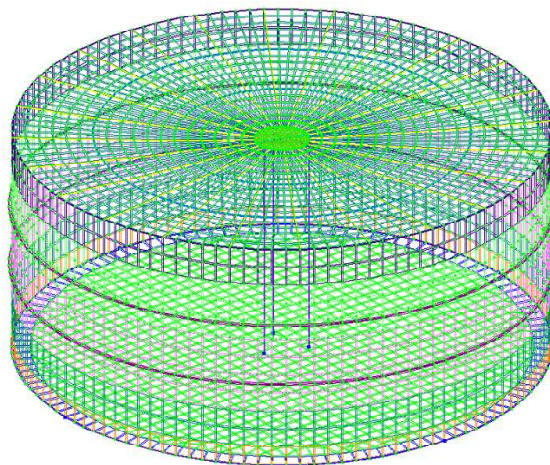
Пример пространственной модели деформации мембранного покрытия резервуара, стабилизируемого оттяжками, представлен на рисунке 7.

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.

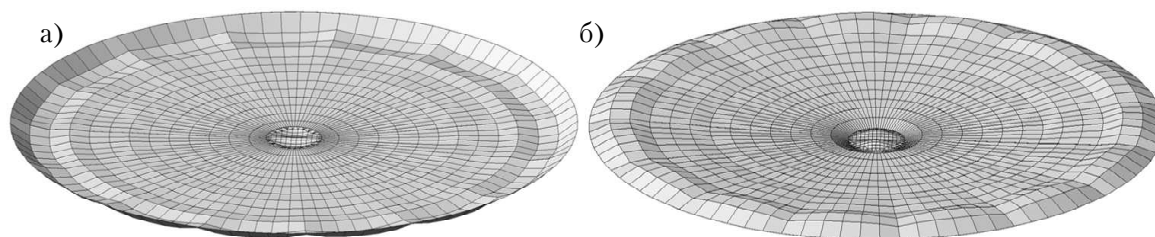








**Рисунок 6.** Расчетная модель со стабилизирующими оттяжками на примере резервуара емкостью 20 тыс. куб. м.



**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.*