



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2011, ТОМ 17, НОМЕР 1, 33–49

УДК 624.953

(11)-0231-1

ВПЛИВ МЕМБРАННОГО ПОКРИТТЯ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТІНКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

В. П. Мущанов, Г. В. Зубенко, А. Г. Варданян

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: zubenkoanna@dr.com*

Отримана 8 січня 2011; прийнята 28 січня 2011.

Анотація. Стаття містить постановку завдання і методи розрахунку і проектування вертикальних циліндричних резервуарів (ВЦР) з провисаючими мембранними покриттями при визначенні параметрів напружено-деформованого стану з урахуванням спільної роботи стінки ВЦР і опорного контура покриття. Проведений огляд способів рішення задачі. На прикладі ВЦР об'ємом 20 тис. м³ з висотами стінки 12 і 18 м виконано аналітичне і чисельне дослідження підкріплюючого впливу стінки ВЦР на основні показники напружено-деформованого стану і техніко-економічні показники провисаючого мембранного покриття при різних способах стабілізації.

Ключові слова: вертикальний циліндричний резервуар, мембранне покриття, напружено-деформований стан, стабілізація.

ВЛИЯНИЕ МЕМБРАННОГО ПОКРЫТИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕНКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, А. Г. Варданян

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: zubenkoanna@dr.com*

Получена 8 января 2011; принята 28 января 2011.

Аннотация. Статья содержит постановку задачи и методы расчета и проектирования вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР) с провисающими мембранными покрытиями при определении параметров напряженно-деформированного состояния с учетом совместной работы стенки ВЦР и опорного контура покрытия. Проведен обзор способов решения задачи. На примере ВЦР объемом 20 тыс. м³ с высотами стенки 12 и 18 м выполнено аналитическое и численное исследование подкрепляющего влияния стенки ВЦР на основные показатели напряженно-деформированного состояния и технико-экономические показатели провисающего мембранного покрытия при различных способах стабилизации.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический резервуар, мембранное покрытие, напряженно-деформированное состояние, стабилизация покрытия.

IMPACT OF MEMBRANE ROOF ON STRESSED AND STRAINED STATE OF VERTICAL TUBULAR TANK WALL

Mushchanov Volodymyr, Zubenko Ganna, Vardanyan Arusyak

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.

E-mail: zubenkoanna@dr.com

Received 8 January 2011; accepted 28 January 2011.

Abstract. The article contains the statement of the problem and analysis and design techniques of the vertical tubular tanks (VTT) with sagging membrane roofs at the stressed and strained state parameters determination with regard to the joint behaviour of the VTT wall and roof support outline. Methods of the problem solution have been reviewed. The analytical and numerical investigation confirming the effect of the VTT wall on the principle indices of the stressed and strained state and engineering and economic figures of the sagging roof at various stabilization ways has been conducted by the example of vertical tubular tank by volume of 20 000 m³ with the height of the walls of 12 and 18 m.

Keywords: vertical tubular tank, membrane roof, stressed and strained state, roof stabilization.

Постановка проблемы

В настоящее время степень эффективности промышленности и конкурентоспособности государственной экономики характеризуется уровнем добычи, транспортировки, переработки и хранения нефти и нефтепродуктов. В связи с этим увеличивается потребность строительства крупных резервуаров. Широко распространены вертикальные и горизонтальные резервуары, как наиболее простые в изготовлении и монтаже.

В традиционных методиках расчета резервуаров, описанных в [1, 2, 3, 4], основные параметры НДС определяются для отдельных конструктивных элементов, и поэтому неясным остается вопрос о влиянии элементов покрытия на стенку резервуара при их совместной работе.

Цель исследования – совершенствование конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров путем применения покрытий в виде провисающих мембранных оболочек, стабилизированных от действия избыточного давления.

Объект исследования – вертикальные цилиндрические резервуары с провисающим мембранным покрытием объемом 20 тыс. м³ при высоте стенки 18 м с диаметром 40 м (вариант I), и высоте 12 м с диаметром 45,6 м (вариант II).

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние и технико-экономические показатели мембранных оболочек покрытия в составе вертикальных цилиндрических резервуаров.

Задачи исследования:

- 1) Определение параметров покрытий в виде провисающих мембранных оболочек на примере вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР) объемом 20 тыс. м³.
- 2) Создание пространственной расчетной модели мембранного провисающего покрытия, работающего в составе ВЦР.
- 3) Анализ влияния различных способов стабилизации на напряженно-деформированное состояние и технико-экономические показатели мембранных покрытий, работающих в составе ВЦР.
- 4) Анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости стенки ВЦР с учетом совместной работы с мембранным покрытием.
- 5) Разработка предложений по стабилизации мембранных покрытий.

1. Определение параметров покрытий в виде провисающих мембранных оболочек

В соответствии с рекомендациями [1, 2] оптимальные размеры проектируемого резервуара со сферической кровлей (табл. 1).

Для уменьшения усилий в опорном контуре при полной нормативной нагрузке начальная геометрия поверхности покрытия принимается провисающей в соответствии с [2]. При всех основных известных достоинствах провисающего мембранного покрытия существенным недостатком является его повышенная деформативность, что обуславливает необходимость стабилизации.

Из известных 4-х способов стабилизации (пригрузом, изгибно-жесткими элементами, предварительным напряжением элементов покрытия, формой покрытия) для исследуемых объектов наиболее приемлемыми являются стабилизация пригрузом или изгибно-жесткими элементами.

2. Создание расчетной пространственной модели мембранного провисающего покрытия, работающего в составе ВЦР

Анализ эффективности выбранных способов стабилизации и влияния жесткости стенки ВЦР на работу мембранного покрытия выполняется с использованием метода конечных элементов, позволяющего наиболее корректно учесть нелинейные факторы, дополнительные параметры проектирования в виде технологических, конструктивных и других особенностей.

Расчет напряженно-деформированного состояния резервуаров выполнялся с использованием программного комплекса SCAD с учетом геометрической нелинейности.

Конечно-элементные модели резервуаров построены в трехмерной постановке с использованием оболочечных и стержневых типов конечных элементов (КЭ). Стенка резервуара и мембранное покрытие моделировались оболочечными КЭ, которые имеют в каждом узле

по 6 степеней свободы (три линейные и три угловые) и воспринимают нормальные, изгибающие и касательные усилия.

Максимальное значение гидростатического давления на днище резервуара объемом 20 тыс. м³ составляет для варианта I – 167 кН/м², для варианта II – 105 кН/м². Сравнение полученных результатов с результатами аналитического расчета показали, что радиальные перемещения и окружные напряжения, которые возникают в стенках резервуаров, для обоих расчетов имеют удовлетворительное совпадение.

При расчете мембранного покрытия учтены 2 вида загрузок:

- 1 – собственный вес конструкций;
- 2 – снеговая нагрузка.

Для учета наиболее неблагоприятных условий работы мембранного покрытия учитываем полное (тип А) и половинное загрузку (тип В) в расчетной схеме временной снеговой нагрузкой.

Пространственная модель ВЦР создается в 3 этапа:

- 1) моделирование мембранного покрытия, без учета совместной работы со стенкой, используя подходы, изложенные в [1];
- 2) формирование расчетной схемы стенки резервуара выполняется по принципам, изложенным в [7];
- 3) комбинирование расчетных моделей 1 и 2 (мембранное покрытие + стенка ВЦР).

На рис.1 показаны конструктивное решение и принятая расчетная схема модели ВЦР с провисающим мембранным покрытием.

Жесткостные характеристики моделей приведены в табличной форме в таблице 2.

Особенностью построения расчетной модели для схемы 1 (стабилизация бетонным пригрузом) является моделирование двуслойной оболочки (первый слой бетон $q = 1,62$ кН/м²,

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Объем резервуара, м ³	Диаметр покрытия, м	Диаметр внутреннего опорного контура, м	Высота стенки резервуара, м	Стрела провиса, м
20 000	40	4	18	1
	45,6	5.6	12	1,141

Таблица 2. Жесткостные характеристики мембранного покрытия

Наименование конструктивных элементов	Схема 1			Схема 2		
	EA, кН	EI _y , кНм ²	t, мм	EA, кН	EI _y , кНм ²	t, мм
Наружный опорный контур	<u>6 038 565</u>	<u>133 503</u>	–	<u>3 337 200</u>	<u>43 802.9</u>	–
	6 411 030	1 007 140		6 411 030	1 007 140	
Радиальные элементы	<u>834 340</u>	<u>11 969.2</u>	–	<u>834 341</u>	<u>11 969.2</u>	–
	775 010	9 671.8		2 506 730	908 727	
Кольцевые элементы	<u>630 390</u>	<u>5 994.9</u>	–	<u>630 390</u>	<u>5 994.9</u>	–
	630 390	5 994.9		630 390	5 994.9	
Внутренний опорный контур	<u>1 408 078</u>	<u>24 681</u>	–	<u>828 160</u>	<u>10 321.1</u>	–
	1 136 560	23 794		1 136 560	23 794	
Мембрана	–	–	4	–	–	4

Примечание: в числителе – значения для варианта I, в знаменателе – значения для варианта II.

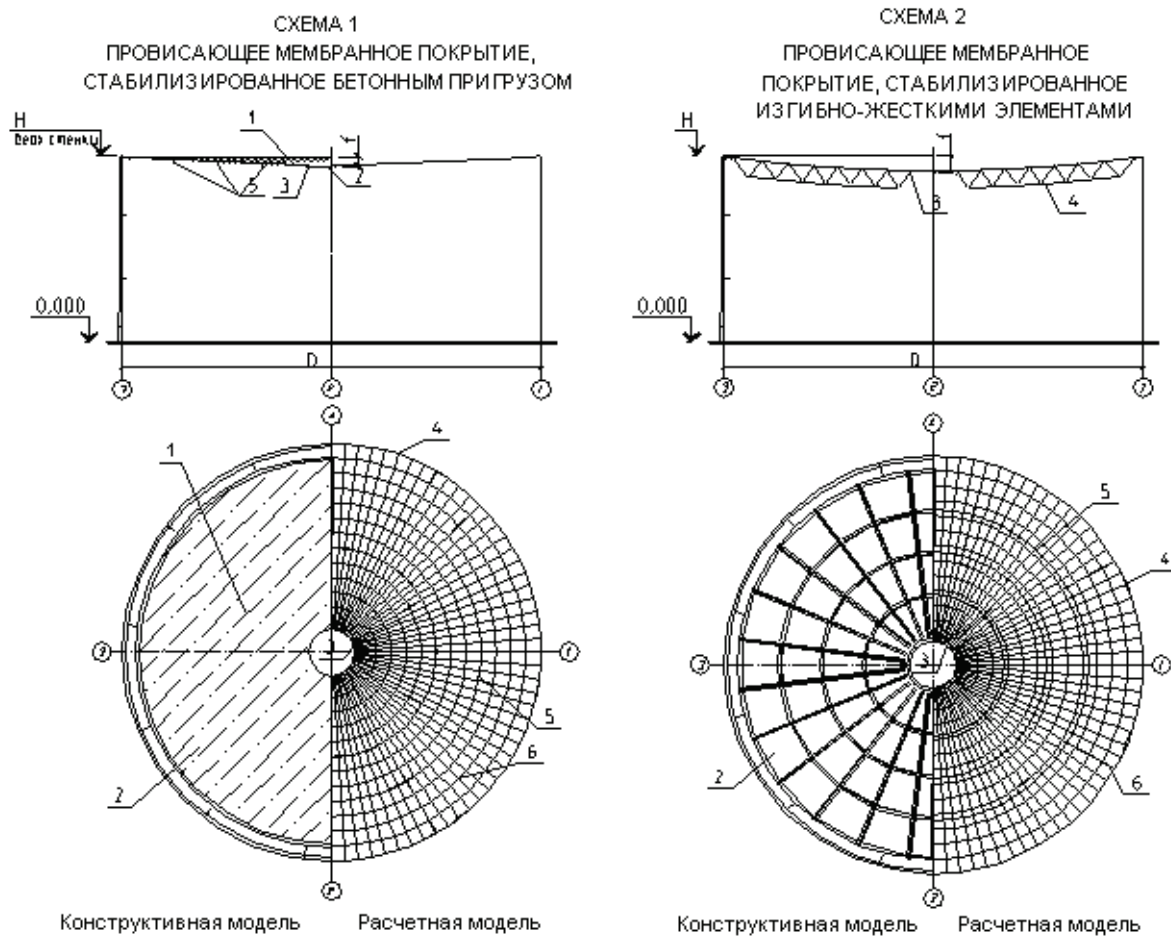


Рисунок 1. Конструктивное исполнение покрытия для рассматриваемых вариантов стабилизации: 1 – бетонный пригруз; 2 – мембрана (4 мм); 3 – внутренний опорный контур (ВОК); 4 – наружный опорный контур (НОК); 5 – кольцевые элементы постели; 6 – радиальные элементы постели.

второй слой – мембранная оболочка), расчетная схема которой создается с учетом фактической последовательности образования конструктивной формы (рис. 2). При этом расчетное сочетание

усилий в элементах может рассматриваться как комбинация факторов, приведенных в таблице 3.

Общие характеристики сформированных расчетных схем представлены в таблице 4.

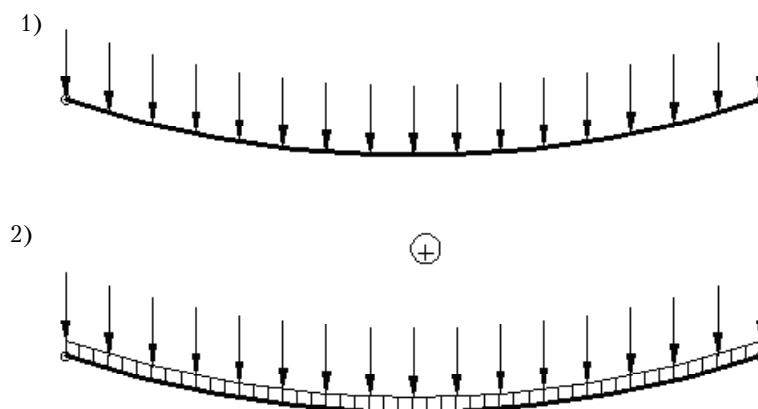


Рисунок 2. Схема приложения бетонного пригруза как нагрузки: 1 – нагрузка от бетона; 2 – совместная работа мембранного покрытия на нагрузки с бетонным пригрузом.

Таблица 3. Комбинация загрузений

	Тип загрузения			
	Собств.вес	Вес «пригруза»	Вес снега	Σ
мембрана	+	+	+	+
НОК	+	+	+	+
Бетонный пригруз	-	-	+	+

Таблица 4. Характеристики расчетных схем

Параметры	с «пригрузом» (рис. 1а, схема 1)	с изгибно-жесткими элементами (рис. 1б, схема 2)
	Кол-во узлов	$\frac{1824}{1056}$
Кол-во эл	$\frac{2736}{1776}$	$\frac{2928}{1776}$
Тип схемы	конструкции из многослойных оболочек	Система общего вида
Тип элементов	44 четырехугольные конечные элементы (КЭ) оболочки	44 четырехугольные конечные элементы (КЭ) оболочки

Примечание: в числителе для варианта I, в знаменателе для варианта II.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты расчета в виде изополей вертикальных перемещений для рассмотренных вариантов стабилизации при полном и половинном нагружении равномерно распределенной снеговой нагрузкой.

Для проверки адекватности сформированных расчетных схем использованы приближенные методики расчета напряженно-деформированного состояния мембранных покрытий изложенные в работах [1, 2]. В таблицах 5, 6 приведены основные формулы отмеченных методик и результаты расчета покрытия по ним без учета влияния присоединенной стенки ВЦР.

Результаты сравнения значений $W_{ц}$, $\sigma_{рад}$, $\sigma_{кольц}$, которые были определены аналитичес-

ким и численным способами, представлены в таблице 7.

3. Анализ влияния различных способов стабилизации на НДС и ТЭП мембранных покрытий, работающих в составе ВЦР

В результате выполненного анализа напряженно-деформированного состояния элементов мембранного покрытия при различных способах стабилизации можно сформулировать следующие выводы:

– максимальные перемещения оболочки покрытия по вертикали от постоянной и временной снеговой нагрузки составляют 20 % от стрелы провисания для схем 1 и 2 по обоим рассматриваемым вариантам, что приемлемо для

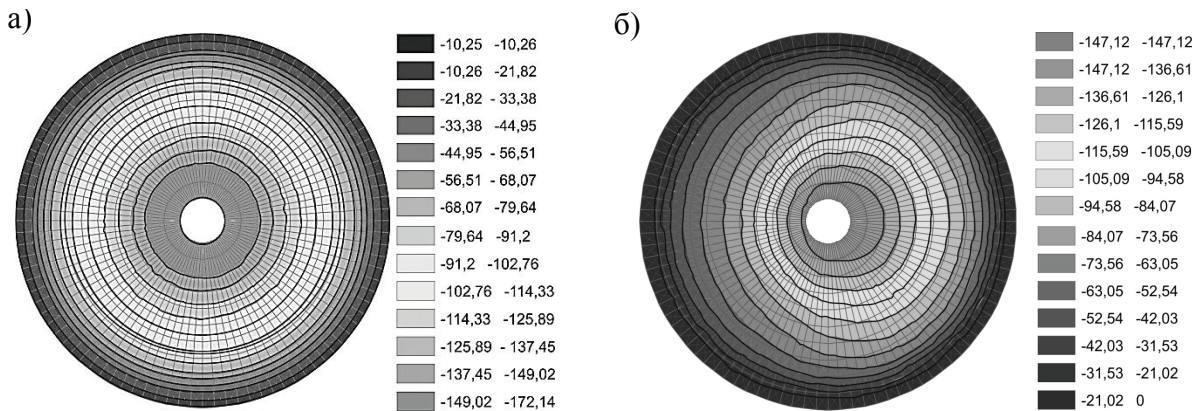


Рисунок 3. Изополя вертикальных перемещений для варианта покрытия, стабилизированного по схеме 1: а – загрузка по типу А; б – загрузка по типу В.

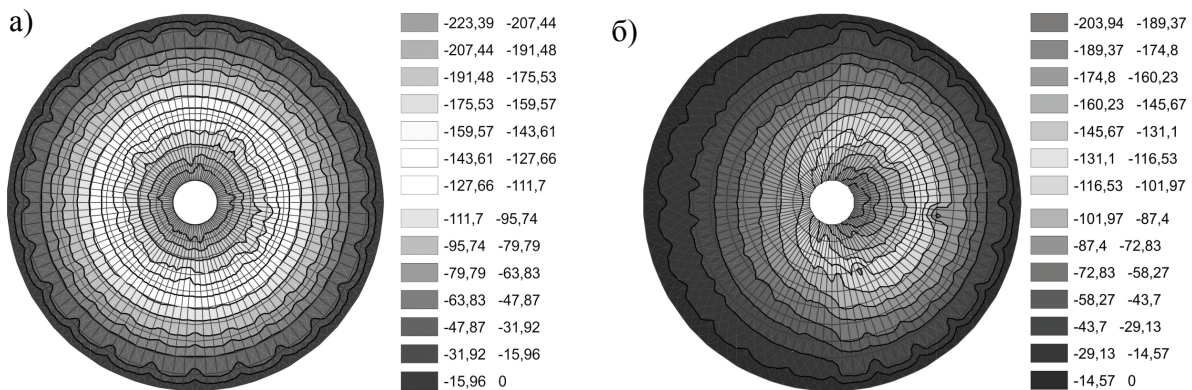


Рисунок 4. Изополя вертикальных перемещений для варианта покрытия, стабилизированного по схеме 2: а – загрузка по типу А; б – загрузка по типу В.

Таблица 5. Основные расчетные формулы по расчету мембранного покрытия на распределенную нагрузку для схемы 1

№ п/п	Формула	Результат
Расчет на равномерно распределенную нагрузку		
1	$\bar{S} = 0,125 \frac{q}{E} \cdot \frac{R}{t} \left(\frac{R}{f_0} \right)^3$	0.092 0.1155
2	$\bar{K} = \frac{(EA)k}{E \cdot t \cdot R}$	0.2025 0.34
Расчет на равномерно распределенную нагрузку		
3	$w_{\text{ц}} = -0,5 \cdot f \cdot \frac{C}{B} + \sqrt{\left(0,5 \cdot f \cdot \frac{C}{B} \right)^2 + \frac{G}{B} \cdot \frac{q \cdot R^4}{E \cdot t \cdot f}}$	-0.292 м -0.330
4	$\sigma_{\text{ц}} = \frac{E w_{\text{ц}}}{R^2} \left[\frac{2f}{n+2} \cdot \frac{1+\bar{K}(n+1-\mu)}{1+\bar{K}(1-\mu)} + \frac{n w_{\text{ц}}}{8(n-1)} \cdot \frac{1+\bar{K}(2n-1-\mu)}{1+\bar{K}(1-\mu)} \right]$	118,5 МПа 123.1
5	$\sigma_{1,k} = \frac{n\bar{K}}{1+\bar{K}(1-\mu)} \cdot \frac{E w_{\text{ц}}}{R^2} \left(\frac{2f}{n+2} + \frac{w_{\text{ц}}}{4} \right)$	40 МПа 67.8
6	$\sigma_{2,k} = \sigma_{1,k} \left(\mu - \frac{1}{\bar{K}} \right)$	-185.6 МПа -179.1
7	$N_{\text{кн}} = -N_{1,k} \cdot R$	3202 кН -6191,6
8	$N_{1,\text{кн}} = \sigma_{1,k} \cdot t$	987 кН 271,32
Расчет оболочки при осесимметричной нагрузке с максимальной интенсивностью в центре покрытия		
9	$w_{\text{ц}}^{(3)} = k_{12} w_{\text{ц}}^{(1)}$	0.317 м 0.410
10	$\sigma_{\text{ц}}^{(3)} = k_{22} \sigma_{\text{ц}}^{(1)}$	134.17 МПа 164.4
11	$\sigma_{1,k(2,k)}^{(3)} = k_{32} \sigma_{1,k(2,k)}^{(1)}$	42.3 МПа 72 (-196)
12	$k_{12} = \left(A + \frac{B}{\bar{S}^n} \right) (1 - \alpha) + 1$	1.08 1.24
13	$k_{22} = \left(0,12 + \frac{0,25}{\bar{S}^{0,25}} \right) (1 - \alpha) + 1$	1.13 1.336
14	$k_{32} = (1,145 - 0,103 \cdot \alpha) 0,978^{\bar{S}^{0,4}}$	1.05 1.095
15	$N_{\text{кн}} = -\sigma_{1,\text{кн}}^{(3)} \cdot t \cdot R$	1115кН -6777

$w_{\text{ц}}$ – вертикальные перемещения в центре покрытия; $\sigma_{\text{ц}}$ – нормальные цепные напряжения в центре оболочки; $\sigma_{1,k}$ – нормальные напряжения в месте примыкания к контуру (радиальные); $\sigma_{2,k}$ – нормальные напряжения в месте примыкания к контуру (кольцевые), $N_{\text{кн}}$ – сжимающих усилий в наружном опорном контуре; $N_{1,\text{кн}}$ – радиальные усилия в мембране соответственно в узлах примыкания к наружному кольцу. Параметры \bar{S} и \bar{K} , а также коэффициенты A , B , C , G уравнения (3) определены в соответствии с указаниями [1].

Таблица 6. Основные расчетные формулы по расчету мембранного покрытия на одностороннюю нагрузку

№п/п	Формула	Результат
1.	$M_{\max} = \beta_1 (EI)_K \sqrt[3]{\frac{(g + v)^2}{E^2 t^2 R}}$	3,43 кНм ----- 9.42
2.	$N_{K, \text{соотв.}} = \beta_2 N_{K, H}$	1817.97 кН ----- 4879
3.	$\sigma = \frac{N_{K, \text{соотв.}}}{A_K} + \frac{M_{\max}}{W_x}$	112.2 МПа ----- 157.8
4.	$\sigma_{\max} \leq R_y \cdot \gamma_{c(t)} \cdot \gamma_{c(g)} \cdot \gamma_{c(c)}$	134.17 ≤ 201 ----- 164.4 ≤ 201

где M_{\max} – максимальный изгибающий момент в контуре; $N_{K, H}$ – сжимающее усилие в контуре от полной нагрузки, равномерно распределенной по поверхности покрытия; $\beta_2, \gamma_{c(t)}, \gamma_{c(g)}, \gamma_{c(c)}$ – коэффициенты, приведенные в [7].

Таблица 7. Сравнения аналитического и численного расчетов для схем с полным загрузением

Критерии	Аналитический расчет		Численный расчет	
	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
$W_{ц}, \text{мм}$	$\frac{-0.317}{-0.330}$	$\frac{-0.161}{-0.221}$	$\frac{-0.157 (-0.335)}{-0.172 (-0.281)}$	$\frac{-0.172}{-0.224}$
$\sigma_{\text{рад}}, \text{МПа}$	$\frac{42.3}{67.8}$	$\frac{20.83}{45.8}$	$\frac{65.8 (-79.8)}{89 (77.8)}$	$\frac{74.4}{81.8}$
$\sigma_{\text{кольц}}, \text{МПа}$	$\frac{-196.1}{-179.2}$	$\frac{-96.6}{-120.9}$	$\frac{-111.07 (-164.2)}{-170.7 (-82.9)}$	$\frac{-116.7}{-176.4}$

Примечание: в числителе – значения для варианта I, в знаменателе – значения для варианта II. В скобках показаны значения для схемы без учета изгибной жесткости слоя бетонного пригруза схема 1*.

обслуживания покрытия и расположения технологического оборудования. Вес бетонного пригруза при толщине бетонного слоя 6 см составил для варианта I – 2034 кН, для варианта II – 2600 кН плюс элементы постели. Суммарный вес изгибно-жестких элементов системы стабилизации по первому и второму вариантам составил соответственно 94 и 169 кН.

Для большей наглядности приведены графики вертикальных перемещений осевого радиального элемента покрытия в составе ВЦР по схемам 1 и 2. На рисунке 5 приведены результаты расчетов при различных способах стабилизации покрытия.

На рисунке 5 обозначены как: вариант I – резервуар с высотой стенки 18 м и диаметром

покрытия 40 м; схема 1 – вертикальные перемещения при стабилизации по схеме 1; схема 2 – вертикальные перемещения при стабилизации по схеме 2; схема 1* – вертикальные перемещения при стабилизации по схеме 1, не учитывающей изгибной жесткости слоя бетонного пригруза; вариант II – резервуар с высотой стенки 12 м и диаметром покрытия 45,6 м; схема 1 – вертикальные перемещения для стабилизации по схеме 1; схема 2 – вертикальные перемещения для стабилизации по схеме 2; схема 1* и схема 2* – вертикальные перемещения радиальных элементов с измененным контуром.

Из рисунка 5 видно, что хотя максимальные вертикальные перемещения покрытия по схеме 2 меньше по сравнению со схемой 1 (в пределах 14–22 %), вместе с тем наблюдается

увеличение прогибов в четверти покрытия, что свидетельствует о недостаточной эффективности этого способа стабилизации для исследуемых пространственных и жесткостных параметров конструкции. Также необходимо учитывать жесткостные характеристики бетонного пригруза, так как это значительно уменьшает значения перемещений (для данного примера на 36–54 %).

Поскольку традиционные инженерные методики расчета мембранных покрытий не учитывают совместную работу покрытия со стенкой, то с целью исследования совместной работы конструктивных элементов было выпол-

нено сравнение результатов численных расчетов при различных способах стабилизации с учетом и без учета совместной работы со стенкой резервуара (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что для схемы 1 при совместной работе стенки резервуара с покрытием суммарные горизонтальные перемещения контура покрытия в среднем увеличились на 20 %, а для схемы 2 уменьшились значения на 8 % по сравнению с базовыми величинами горизонтальных перемещений, определенных без учета сдерживающего влияния стенки ВЦР.

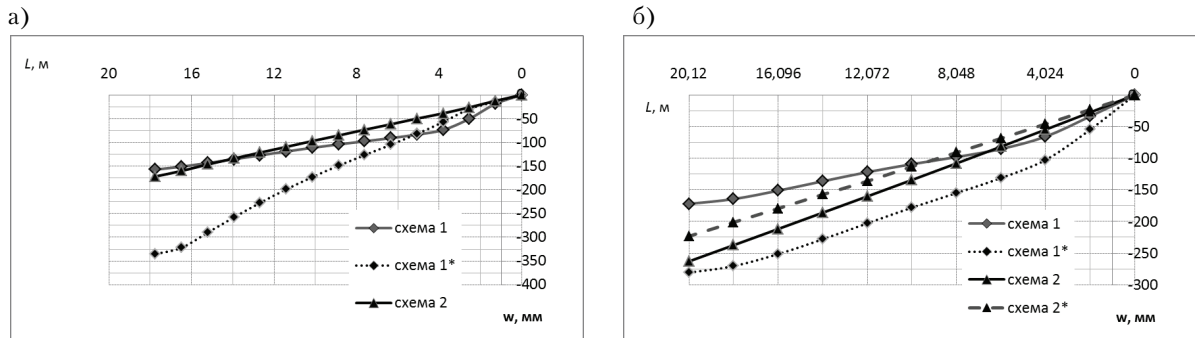


Рисунок 5. Вертикальные перемещения радиальных элементов: а) для варианта I; б) для варианта II.

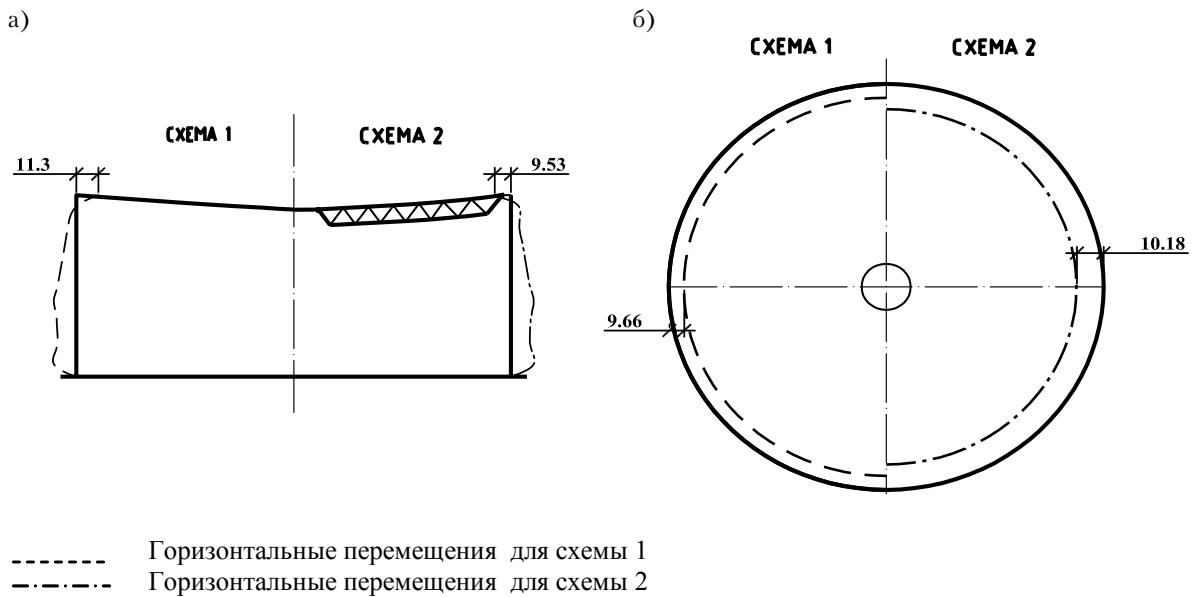


Рисунок 6. Отклонения по горизонтали стенки ВЦР: а – перемещения контура при учете совместной работы стенки ВЦР с покрытием; б – суммарные перемещения наружного контура покрытия.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости стенки ВЦР с учетом совместной работы с мембранным покрытием

В рассматриваемых вариантах стенка резервуара состоит при $H = 18$ м из 12 поясов и при $H = 12$ м – 8 поясов, равной ширине листа (1,5 м).

При создании расчетной схемы стенки резервуара моделируется жесткое сопряжения днища с основанием и шарнирное прикрепление стенки к днищу, что является характерным для современных нормативных документов при моделировании работы уторного узла резервуаров больших объемов [9].

По результатам численного и аналитического расчета проверка прочности и устойчивости элементов выполнялась в соответствии с требованиями СНиП 11-23-81* [10] и ВБН В.2.2-58.2-94 [7]. Расчетное давление каждого

пояса стенки определялось в области наивысших кольцевых напряжений от низа рассчитываемого пояса на расстоянии $0,6\sqrt{rt}$.

Результаты расчета стенки резервуара на прочность для вариантов I и II при принятых жесткостных характеристиках наружного опорного контура (табл. 2) приведены в таблицах 8.1 и 8.2 соответственно (значения в числителе для схемы 1, в знаменателе для схемы 2) для варианта постоянной, временной (снеговой) и гидростатической нагрузок.

Анализируя уровень эквивалентных напряжений в стенке ВЦР, следует обратить внимание на повышенный уровень напряжений в верхних поясах стенки, что объясняется действием краевого эффекта, обусловленного сопряжением стенки ВЦР с диском мембранного покрытия.

Результаты расчета стенки резервуара на устойчивость для вариантов I и II при принятых жесткостных характеристиках наружного

Таблица 8.1. Результаты расчета стенки резервуара на прочность для варианта I (резервуар с высотой стенки 18 м)

№ пояса	P_x , кПа	γ_c	t , мм	R_{wy} , МПа	Аналитический расчет, МПа			Численный расчет, МПа		
					σ_1	σ_2	$\sigma_{экр}$	σ_1	σ_2	$\sigma_{экр}$
XIII	0.00	0.7	8	250	4.55	0.00	4.55	21.79	31.75	28.13
					2.73		2.73	5.02	25.17	23.07
XII	4.26	0.7	8	250	5.32	10.64	9.22	5.25	17.78	15.82
					3.50		9.39	2.22	18.36	17.36
XI	18.45	0.7	8	250	6.09	46.12	43.39	5.06	57.52	55.16
					4.27		44.14	2.46	56.77	55.58
X	32.64	0.7	10	250	6.40	65.27	62.32	4.05	73.94	72.00
					4.58		63.11	2.28	73.61	72.50
IX	46.83	0.7	10	250	7.17	93.65	90.28	4.14	98.59	96.59
					5.35		91.10	2.53	98.22	96.98
VIII	61.02	0.7	10	250	7.94	122.03	118.26	4.24	127.12	125.05
					6.12		119.09	2.71	126.66	125.33
VII	75.21	0.7	10	250	8.71	150.41	146.25	4.35	154.16	152.03
					6.89		147.09	2.85	153.65	152.25
VI	89.40	0.7	10	340	9.48	178.79	174.25	4.46	185.24	183.05
					7.66		175.09	2.97	184.65	183.18
V	103.59	0.7	14	340	8.62	147.98	143.87	4.58	199.56	197.31
					6.80		144.70	3.1	198.78	197.25
IV	117.78	0.7	14	340	9.39	168.25	163.76	3.37	181.41	179.75
					7.57		164.60	2.3	180.94	179.80
III	131.97	0.7	16	340	9.46	164.96	160.44	3.49	180.67	178.95
					7.64		161.28	2.4	180.29	179.10
II	146.16	0.7	16	340	10.23	182.70	177.80	3.17	198.92	197.35
					8.41		178.64	2.2	198.29	197.20
I	160.35	0.6	18	340	10.28	178.16	173.25	2.93	137.54	136.10
					8.46		174.09	2.05	136.9	135.89

опорного контура (табл. 2) приведены в таблицах 9.1 и 9.2 соответственно (значения в числителе для схемы 1, в знаменателе для схемы 2).

Устойчивость стенки проверяем при пустом резервуаре на совместное воздействие меридионального сжатия параллельно образующей и кольцевого сжатия от равномерного внешнего давления нормального и боковой поверхности в соответствии со СНиП 11-23-81* [10] и с учетом требований ВБН В.2.2-58.2-94 [7] от воздействия вакуума без учета ветрового давления.

В таблицах 9.1 и 9.2 незакрашенными показаны ячейки для поясов, удовлетворяющим требованиям устойчивости.

Из табл. 9.1 видно, что для варианта I при стабилизации по схеме 1 пояса с VI по XIII не проходят по устойчивости и требуется увеличения толщины поясов на 20–40 %. Для обеспечения устойчивости стенки резервуара при стабилизации по схеме 2 необходимо увеличить толщины поясов VI–VIII и XI–XIII на 10 %. Аналогично для варианта II из табл. 9.2

видно, что не удовлетворяют условиям устойчивости по схеме 1 пояса с III по IX, которые необходимо увеличить на 40 и 20 %, а по схеме 2 все пояса удовлетворяют требованиям устойчивости.

Для оценки поведения стенки резервуара при ее совместной работе с конструкцией покрытия приведены графики горизонтальных перемещений стенки резервуара (рис. 7). Значения перемещений для схемы 1 и 2 приведены по максимальным загрузкам (полное загружение снеговой и постоянной нагрузками).

Сравним допустимые отклонения (\pm мм) образующих стенки резервуара от вертикали [8], с полученными в численном расчете (табл. 10).

Вывод: поскольку для некоторых поясов зафиксированные величины отклонений превышают нормируемые, то этот факт требует специальных исследований проверки устойчивости элемента оболочки-стенки при наличии отмеченных начальных кривизн.

Таблица 8.2. Результаты расчета стенки резервуара на прочность для варианта II (резервуар с высотой стенки 12 м)

№ пояса	P, кПа	γ_c	t, мм	R _{выс} , МПа	Аналитический расчет, МПа			Численный расчет, МПа		
					σ_1	σ_2	$\sigma_{экр}$	σ_1	σ_2	$\sigma_{экр}$
IX	0	0,7	10	250	-5,09	0	5,09	-19,17	13,48	28,42
					-3,28		3,28	-17,84	9,9	24,35
VIII	3,55	0,7	10	250	-5,17	8,1	11,59	-4,91	4,66	8,29
					-3,36		10,2	-3,39	4,96	7,27
VII	17,74	0,7	10	250	-5,25	40,48	43,34	-4,79	32,37	35,01
					-3,44		42,31	-3,27	32,25	34
VI	31,93	0,7	10	250	-5,33	72,86	75,67	-4,84	64,96	67,51
					-3,52		74,68	-3,27	64,78	66,48
V	46,12	0,7	10	250	-5,41	105,24	108,06	-4,92	96,66	99,21
					-3,6		107,1	-3,31	96,48	98,18
IV	60,31	0,7	10	340	-5,5	137,62	140,46	-5,01	130,34	132,92
					-3,69		139,51	-3,38	130,08	131,8
III	74,5	0,7	10	340	-5,58	170	172,87	-5,12	155,74	158,36
					-3,77		171,93	-3,46	155,29	157,05
II	88,69	0,7	12	340	-4,73	168,65	171,07	-4,37	173,83	176,06
					-3,22		170,29	-2,97	173,12	174,62
I	102,88	0,6	14	340	-4,13	167,69	169,79	-3,85	92,26	94,24
					-2,84		169,13	-2,64	91,55	92,9

Таблица 9.1. Результаты расчета стенки резервуара на устойчивость для варианта I

№ пояса	t, мм	σ_{cr1} , МПа	σ_{cr2} , МПа	Аналитический расчет, МПа			tприн, мм
				σ_1 / σ_{cr1}	σ_2 / σ_{cr2}	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq 1$	
XIII	8	4.94	2.42	0.92	0.31	1.23	10
				0.55		0.86	8
XII	8	4.94	2.42	1.08	0.31	1.39	10
				0.71		1.02	9
XI	8	4.94	2.42	1.23	0.31	1.54	11
				0.86		1.17	9
X	10	6.70	3.38	0.96	0.18	1.13	11
				0.68		0.86	10
IX	10	6.70	3.38	1.07	0.18	1.25	12
				0.80		0.98	10
VIII	10	6.70	4.22	1.19	0.14	1.33	12
				0.91		1.06	11
VII	10	6.70	4.22	1.3	0.14	1.44	13
				1.03		1.17	11
VI	10	6.70	4.22	1.42	0.14	1.56	14
				1.14		1.29	12
V	14	9.37	6.99	0.92	0.06	0.98	14
				0.73		0.79	14
IV	14	10.09	6.99	0.93	0.06	0.99	14
				0.75		0.81	14
III	16	11.54	8.55	0.82	0.04	0.86	16
				0.66		0.71	16
II	16	12.03	8.55	0.85	0.04	0.89	16
				0.70		0.74	16
I	18	13.72	10.20	0.75	0.03	0.78	18
				0.62		0.65	18

5. Разработка предложений по стабилизации мембранных покрытий в составе ВЦР

Сравнивая варианты, можно сделать следующие выводы:

- В резервуаре объемом 20 тыс. м³:
 - для варианта I (высота стенки 18 м) общая масса металлоконструкций увеличивается по сравнению с типовым вариантом по первой схеме стабилизации на 16 % и для 2-й схемы на 12 %;
 - для варианта II (высота стенки 12 м) общая масса металлоконструкций увеличивается по сравнению с типовым вариантом по первой схеме стабилизации на 4,7 % и для 2-й схемы на 0,2 %.
- Так как стенка ВЦР предлагаемых вариантов была рассчитана с учетом требований ВБН.В. 2.2-58.2-94, где значение коэффициента условий работы γ_c меньше по срав-

нению с ранее действовавшими нормами, то наблюдается увеличение массы стенки для предлагаемых вариантов (см. табл. 10) для 1-й схемы стабилизации по варианту I на 4 т, и по варианту II на 58 т и, соответственно, на 13 и 20 т для 2-й схемы стабилизации.

- По сравнению с типовым сферическим покрытием, которое применяется при проектировании вертикальных цилиндрических резервуаров, предлагаемый вариант провисяющего мембранного покрытия дает эффект снижения массы покрытия для варианта I по схеме 1 в пределах 18 %, по схеме 2–10 %, для варианта II – 49,0 и 27,5 % соответственно, но необходимость стабилизации увеличивает вертикальную нагрузку на покрытие.

В соответствии с требованиями [7, 10] выполняется проверка наружного контура на прочность. Результаты расчета приведены в таблице 12.

Таблица 9.2. Результаты расчета стенки резервуара на устойчивость для варианта II

№ пояса	t, мм	σ_{cr1} , МПа	σ_{cr2} , МПа	Аналитический расчет, МПа			t _{прин} , мм
				σ_1 / σ_{cr1}	σ_2 / σ_{cr2}	$\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_{cr1} + \sigma_{cr2}} \leq 1$	
IX	10	5,6	3,16	0,91	0,22	1,13	12
				0,59		0,81	10
VIII	10	5,6	3,16	0,92	0,22	1,14	12
				0,6		0,82	10
VII	10	5,6	3,16	0,94	0,22	1,16	12
				0,61		0,83	10
VI	10	5,6	1,98	0,95	0,22	1,17	12
				0,63		0,85	10
V	10	5,6	1,98	0,97	0,17	1,19	14
				0,64		0,86	10
IV	10	5,6	1,98	0,98	0,17	1,15	14
				0,66		0,83	10
III	10	5,6	1,98	1	0,17	1,17	14
				0,67		0,84	10
II	12	7,15	2,6	0,66	0,11	0,77	14
				0,45		0,56	12
I	14	8,72	3,27	0,47	0,07	0,54	14
				0,33		0,4	14

где γ_c – коэффициент условий работы стенки резервуара при расчете на устойчивость, $\gamma_c = 1$; σ_1 – расчетное продольное сжимающее напряжение в оболочке; σ_2 – расчетное кольцевое напряжение в оболочке; σ_{cr1} , σ_{cr2} – критические меридиональные и кольцевые напряжения, определяемые по п. 8.5, 8.8 [10].

Для сравниваемых схем стабилизации значительное влияние на изменение суммарных усилий в опорном контуре оказывает соотношение жесткостных характеристик пролетной и опорной частей мембранных покрытий. Так, несмотря на 50%-е уменьшение постоянной нагрузки на покрытие при переходе со схемы 1 на схему 2 суммарные напряжения в опорном контуре возрастают в пределах 40 % для резервуара с высотой стенки 12 м и на 13 % для резервуара с высотой стенки 18 м. Это объясняется перераспределением усилий между оболочкой и опорным контуром, связанным со снижением изгибной жесткости пролетной части конструкции.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) По большинству критериев для сравниваемых компонентов напряженно-деформированного состояния элементов пространственной конструкции вертикального цилиндрического резервуара с мембранным покрытием более предпочтительным оказывается стабилизация путем введения в конструкцию покрытия изгибно-жестких элементов.
- 2) Для рассмотренных вариантов конструкций ВЦР наибольшее влияние на стенку оказывает покрытие, стабилизированное по схеме 1 (и по I, и по II вариантам), т. к.

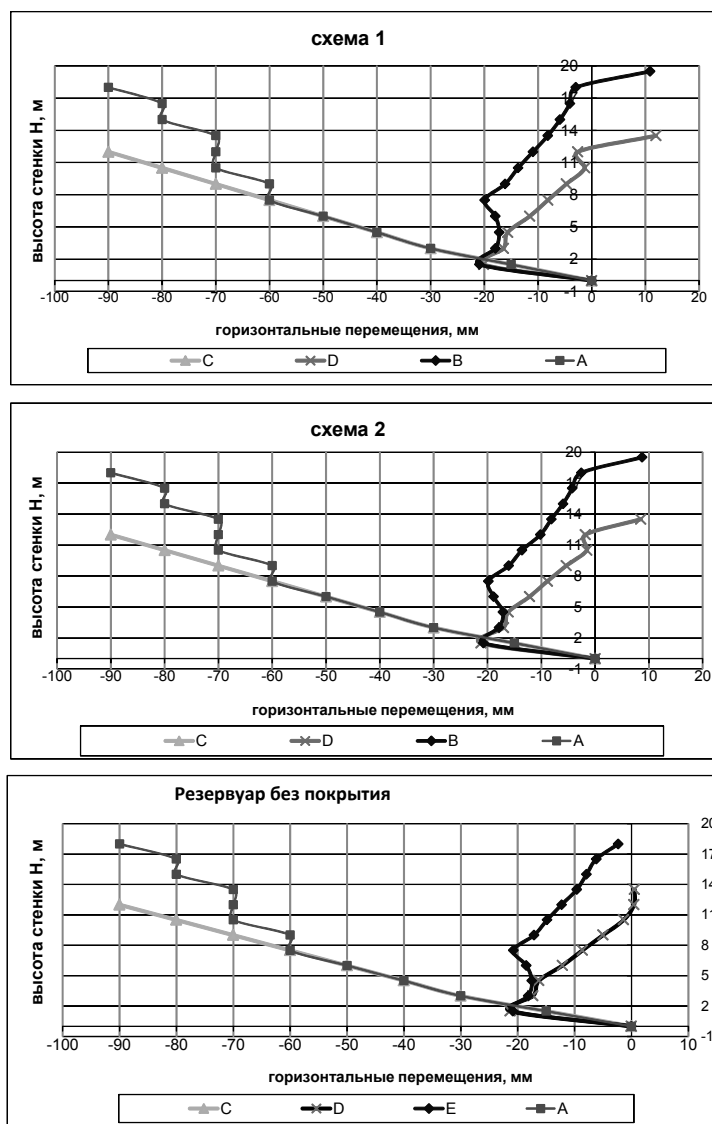


Рисунок 7. Горизонтальные перемещения стенки резервуара: А, С – нормативные горизонтальные перемещения стенки ВЦР при совместной работе стенки резервуара с провисающим мембранным покрытием при высоте стенки 18 и 12 м соответственно; В, D – полученные горизонтальные перемещения стенки ВЦР при совместной работе стенки резервуара с провисающим мембранным покрытием при высоте стенки 18 и 12 м соответственно.

Таблица 10. Сравнение горизонтальных перемещений стенки ВЦР

Резервуар	Номер пояса											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
20 тыс м ³	Для резервуаров высотой до 18 м											
	$\frac{15}{(21,7)}$	$\frac{30}{(17,8)}$	$\frac{40}{(17,2)}$	$\frac{50}{(17,9)}$	$\frac{60}{(18,5)}$	$\frac{60}{(20,9)}$	$\frac{70}{(17,6)}$	$\frac{70}{(14,9)}$	$\frac{70}{(12,3)}$	$\frac{80}{(9,8)}$	$\frac{80}{(7,5)}$	$\frac{90}{(8,7)}$
	Для резервуаров высотой до 12 м											
	$\frac{15}{(21,3)}$	$\frac{30}{(17,3)}$	$\frac{40}{(16,3)}$	$\frac{50}{(12,1)}$	$\frac{60}{(8,6)}$	$\frac{70}{(4,99)}$	$\frac{80}{(1,4)}$	$\frac{90}{(0,5)}$	-	-	-	-

Примечание: в числителе – допустимые отклонения (\pm мм) образующих стенки резервуара от вертикали, в знаменателе – полученные отклонения стенки резервуара.

Таблица 11. Сравнение типовых вариантов с предложенными

Показатели	Типовой вариант, т	Схема 1, т	Схема 2, т
Вес элементов резервуара			
Стенка	$\frac{208}{146,77}$	$\frac{212}{205,08}$	$\frac{195}{166,9}$
Опорный контур	$\frac{12,1}{22,73}$	$\frac{15,9}{36,06}$	$\frac{15,9}{36,06}$
Покрытие	$\frac{71,22}{118,75}$	$\frac{58,14}{60,5}$	$\frac{64,5}{85,8}$

Таблица 12. Напряжения в опорном контуре при двух способах загрузки

Высота стенки	Равномерно распределенная нагрузка		Половинная нагрузка	
	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
	$\sigma_N + \sigma_M = \sigma$ (МПа)	$\sigma_N + \sigma_M = \sigma$ (МПа)	$\sigma_N + \sigma_M = \sigma$ (МПа)	$\sigma_N + \sigma_M = \sigma$ (МПа)
12	92,6+16,1 = 109,71	79,3+91,6 = 172,35	84,6+147,3 = 234,84	66,4+67,3 = 135,04
18	112,9+29,54=142,4	66,88+94,1=160,9	74,9+49,4=124,3	56,25+89,7=145,9

вследствие увеличения вертикальной нагрузки возрастают меридиональные напряжения, которые вносят наибольший вклад при расчете на устойчивость (табл. 9.1, 9.2).

3) Для обобщенной оценки стоимостных показателей сравниваемых вариантов стабилизации необходимо проведение численного

эксперимента для всего типоряда резервуаров больших объемов (20–50 тыс. м³) при различных соотношениях постоянной и временной загрузок с учетом действующих на сегодняшний день цен на материалы и стоимости трудозатрат на изготовление, возведение и эксплуатацию сооружения.

Литература

1. Мембранные конструкции зданий и сооружений : Справочное пособие. В 2-х ч. Ч. 1 / Под ред. В. И. Трофимова и П. Г. Еремеева ; ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1990. – 248 с.
2. Металлические конструкции : [Учеб. для вузов по спец. «Пром. и гражд. стр-во» / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников и др.] ; Под общ. ред. Е. И. Белени. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1985. – 596 с.
3. Корниенко, В. С. Сооружение резервуаров / В. С. Корниенко, Б. В. Поповский. – М. : изд-во литературы по строительству, 1971. – 226 с.
4. Лессиг, Е. Н. Листовые металлические конструкции / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М. : Стройиздат, 1970. – 488 с.

References

1. Ed. V. I. Trofimov and P. G. Eremeev. Membrane frames of buildings and structures: Reference book in 2 parts. P. 1. Moscow: Stroiizdat, 1990. 248 p. (in Russian)
2. Belenia, E. I.; Baldin, V. A.; Vedenikov, G. S. et al.; Ed. E. I. Belenia. Metal structures. 6th edition, revised and supplemented. Moscow: Stroiizdat, 1985. 596 p. (in Russian)
3. Kornienko, V. S.; Popovsky, B. V. Reservoir construction. Moscow: Publishing House of literature in civil engineering, 1971. 226 p. (in Russian)
4. Lessig, E. N.; Lileyev, A. F.; Sokolov, A. G. Sheet metal structures. Moscow: Stroiizdat, 1970. 488 p. (in Russian)

5. Типовой альбом №704-1-171.84. «Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 м³». – К. : Южгинефтепровод, 1984. – 35 с.
6. Типовой альбом № 7-02-273 «Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 м³». – К. : ЦНИИпроектстальконструкции им. Мельникова, 1974. – 35 с.
7. Відомчі будівельні норми України. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа : ВБН В.2.2-58.2-94. – Вводяться вперше. – К. : Держкомнафтогаз, 1994. – 78 с.
8. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту / Государственный комитет СССР по обеспечению нефтепродуктами. – М. : Недра, 1988. – 269 с.
9. Welded Tanks for Oil Storage / American Petroleum Institute. – 11th Edition, Includes Addendum 1 (2008) and Addendum 2 (2009). – 01-Jun-2007. – 436 p.
10. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции : СНиП II-23-81*. – Взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 ; введ. 1982-01-01. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
5. Standard album No. 704-1-171.84 «Steel vertical cylindrical reservoir for petroleum and petrochemicals of capacity 20 000 m³». Kiyv: Yuzhginefteprovod, 1984. 35 p. (in Russian)
6. Standard album No. 7-02-273 84 «Steel vertical cylindrical reservoir for petroleum and petrochemicals of capacity 20 000 m³». Kiyv: TsNIiproektstal-konstruktsii im. Melnikov, 1974. 35 p. (in Russian)
7. Building norms. Steel vertical reservoirs for storing petroleum and petrochemicals at the pressure of the saturated vapour not higher than 93.3 kPa: VBN B.2.2-58.2-94. Kiyv: Derzhkomnaftogaz, 1994. 78 p. (in Ukrainian)
8. Operational regulations and overhaul manual for reservoirs. Moscow: Nedra, 1988. 269 p. (in Russian)
9. Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute. 11th Edition, Includes Addendum 1 (2008) and Addendum 2 (2009), 01-Jun-2007. 436 p.
10. Structural Rules and Regulations. Steel structures: SNiP II-23-81*. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 90 p. (in Russian)

Муцанов Володимир Пилипович – д.т.н., професор кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Академік Української академії наук, академік Академії будівництва і архітектури, член-кореспондент Академії архітектури України, дійсний член Міжнародного інституту інженерів-будівельників і член Міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Зубенко Ганна Василівна – асистент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: динаміка споруд, розрахунок і проектування просторових конструкцій.

Варданян Арусяк Гегамівна – магістрант кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування ємнісних споруд.

Муцанов Владимир Филиппович – д.т.н., профессор кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Академик Украинской академии наук, академик Академии строительства и архитектуры, член-корреспондент Академии архитектуры Украины, действительный член Международного института инженеров строителей и член Международной ассоциации «Пространственные конструкции». Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Зубенко Анна Васильевна – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: динамика сооружений, расчет и проектирование пространственных конструкций.

Варданян Арусяк Гегамовна – магистрант кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование емкостных сооружений.

Mushchanov Volodymyr – D. SC. (Eng.), a Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A Member of the Ukrainian Academy of Sciences, a Member of the Ukrainian Academy of Civil Engineering and Architecture, a Corresponding Member of Ukrainian Academy of Architecture, a Full Member of the International Institute of Civil Engineers, a Member of the International Association of Three-Dimensional Structures. Research interests: theory of reliability, analysis, design and technical diagnosis of three-dimensional metal structures.

Zubenko Ganna – a teaching fellow of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: dynamics of structures, analysis and design of three-dimensional structures.

Vardanyan Arusyak – a master's-student of the Theoretical, Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: design work of tanks and reservoirs.