

Т. Түрсүнкүлүлы¹, Н. Жаңабай^{1*}, С. Буганова², С. Даурбекова²

¹Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

²Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

Информация об авторах:

Түрсүнкүлүлы Тимур – докторант кафедры «Строительства и строительные материалы», НАО Южно-Казахстанского Университета имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0001-6215-7677>, email: timurtursunkululy@gmail.com

Жаңабай Нұрлан – руководитель докторанта, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительства и строительные материалы», НАО Южно-Казахстанского Университета имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-8153-1449>, email: Nurlan.zhanabay777@mail.ru

Буганова Светлана – кандидат технических наук, доцент факультета «Строительных технологий, инфраструктуры и менеджмента», Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-2005-3305>, email: Svetlanabuganova7@gmail.com

Даурбекова Салтанат – кандидат технических наук, доцент факультет «Строительных технологий, инфраструктуры и менеджмента», Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-2353-8930>, email: Salta_daur@mail.ru

*Автор корреспонденции: e-mail: Nurlan.zhanabay777@mail.ru

СТАЛЬНОЙ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВУАР ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ, УПРОЧНЕННЫЙ ОБМОТКОЙ

Аннотация. В статье исследовались случаи разного заполнения резервуара нефтью и без нефти. Моделировались три варианта обмотки: с одним интервалом между витками, с двойным интервалом и с тройным интервалом. Рассматривалось два типа обмотки: из высокопрочной стальной проволоки и из композитной нити. Получено, что при обмотке стальной проволокой с тройным интервалом напряжения в конструкции не превышают 34,2% предела текучести. При этом высота налива нефти существенно не влияет на её прочность. Использование композитной нити приводит к росту напряжений до 47,2% от предела текучести, но позволяет снизить массу резервуара с обмоткой. При обмотке композитной нитью с тройным интервалом масса конструкции увеличивается всего на 3,6%.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический стальной резервуар, предварительное напряжение, рабочие нагрузки, шаг намотки, напряженно-деформированное состояние оболочки, локализация напряжений, метод конечных элементов.

Введение

Эксплуатация стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти в районах с повышенной сейсмической активностью требует осуществления дополнительных мер по обеспечению и повышению их безопасности. Чтобы уменьшить вероятность отказа резервуара предлагается осуществлять упрочнение конструкции предварительно-напряженной обмоткой. Исследуются преимущества и недостатки обмотки из высокопрочной стальной проволоки и гладкой композитной нити.

Конструктивный отказ в резервуарах происходит вследствие многих причин. Одной из причин является образование зон локализации напряжений в стенке резервуара [1–2]. В работах [3–4] показано, что упрочнение цилиндрических труб и резервуаров обмоткой из высокопрочной стальной проволоки или

из гладкой композитной нити приводит к упрочнению конструкции. В статье [5] представлены результаты моделирования эксплуатации металлических резервуаров, наполненных водой. В исследовании [6] изложена методика численного анализа составной конструкции при эксплуатационных нагрузках, связанных с транспортировкой. В работе [7] рассматривается цилиндрический резервуар для хранения нефтехимических продуктов. Отмечено, что типичная конструкция резервуара имеет стенку, которая моделируется тонкой оболочкой. Исследуется динамический отклик конструкции на внешнюю взрывную нагрузку. Конструкция упрочнена противовзрывными полосами. Проведено моделирование при различных параметрах противовзрывных полос при внешнем взрыве. В статье [8] изучены особенности деформационных процессов цилиндрических стальных резервуаров с дефектами. Исследовался продольный изгиб стенки резервуара при постоянном внешнем давлении. Показано, что наличие начальных дефектов в конструкции существенно снижает прочность резервуаров.

Цилиндрические конструкции, в том числе и многослойные, широко исследуются в современных научных статьях. В работах [9–10] представлены результаты исследований цилиндрических оболочек из функционально-градиентных материалов. Показана возможность использования усредненных механических характеристик для численных исследований конструкции.

Расширение возможностей современных расчетных комплексов, базирующихся на конечно-элементных моделях, позволяет моделировать поведение конструкций при эксплуатационных и экстремальных нагрузках с высокой точностью [11–12]. Для таких исследований наиболее эффективно задачу решать в трехмерной постановке.

Анализ публикаций показал, что исследования по использованию обмотки для усиления прочности конструкции вертикального цилиндрического стального резервуара для нефти практически отсутствуют.

В данном исследовании проводится численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) стального вертикального цилиндрического резервуара при эксплуатационных нагрузках. Резервуар моделируется двумя способами: с постоянной и с переменной по высоте толщиной стенки. Предварительно-напряженная обмотка моделируется при различном шаге нанесения витков вдоль резервуара. Рассматриваются случаи полного и половинного заполнения резервуара жидкостью, а также случай резервуара без жидкости. Анализируется НДС нагруженной конструкции для обеих моделей резервуара. Определяются зоны локализации напряжений. Проводится сравнительный анализ результатов, полученных по упрощенной и уточненной модели.

Материалы и методы

Исследуются две модели стального вертикального цилиндрического резервуара. Для обеих моделей внутренний диаметр резервуара имеет величину 18,38 м, а высота стенки резервуара составляет 11,92 м. Максимальная высота налива жидкости, согласно проектным данным в сейсмических районах, при-

нимается равной 11,08 м. Для Модели 1 принимается постоянная по высоте толщина стенки, равная 5 мм. А для Модели 2 стенка по высоте состоит из четырех поясов. Нижний первый пояс имеет толщину 8 мм и высоту 1,49 м. Второй пояс имеет толщину 6 мм и высоту 1,49 м. Третий пояс имеет толщину 5 мм и высоту 2,98 м. Верхний четвертый пояс имеет толщину 4 мм и высоту 5,96 м. Общая высота резервуара для Модели 1 и для Модели 2 одинаковая и равна 11,92 м. Массы обеих моделей равны и составляют 27 023 кг. Для обеих моделей нижний край резервуара заземлён.

Механические свойства стали для обеих моделей использовались такие: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность материала $\rho = 7850$ кг/м³, предел текучести $\sigma_{0,2} = 245$ МПа. Появление зон пластического деформирования материала считается недопустимым.

Поскольку для Модели 2 учитывалось изменение толщины стенки по высоте резервуара, то для численных исследований применялся метод конечных элементов [13, 14] и задача решалась в трехмерной постановке [15] как для Модели 2, так и для Модели 1. Расчеты проводились в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Для получения равномерной сетки из трехмерных конечных элементов выбрался Sweep Method с параметром Automatic Thin. На величину конечного элемента задавались ограничения по размеру. В результате наложенных ограничений удалось добиться равномерной сетки, представленной на рис. 1. На нижнем крае цилиндрического резервуара, в месте закрепления стенки резервуара с днищем, задавалось граничное условие Fixed Support.

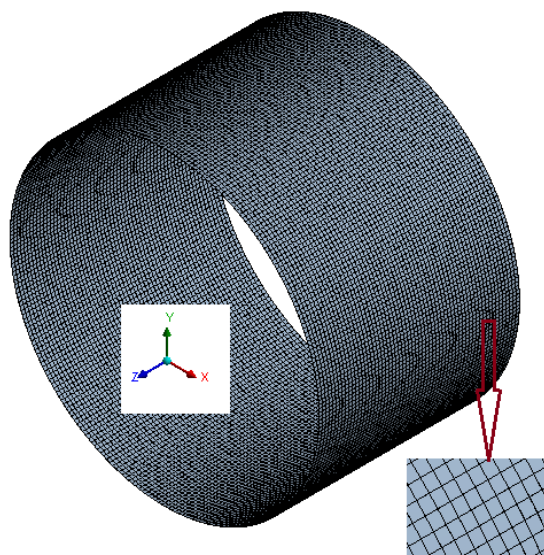


Рисунок 1 – Конечно-элементная сетка для стенки резервуара

Предварительные напряжения в стенке резервуара возникают вследствие действия силы натяжения обмотки N . На их величину влияют как сама сила натяжения, так и шаг навивки нити проволоки. Сила N используется для определения силы давления P между стенкой резервуара и проволокой. Рассматривается уравнение равновесия на основании безмоментной теории оболочек [3].

Его интегрирование приводит к равенству $P=N$. Шаг навивки нити проволоки используется для определения величины давления на внешнюю поверхность стенки резервуара [3]. Рассматривалось три варианта навивки. Для первого варианта обмотка наносилась с одним интервалом между витками вдоль стенки резервуара, для второго – с двойным интервалом, а для третьего – с тройным интервалом. Величина интервала соответствовала величине диаметра проволоки. Предполагалось, что давление, которое оказывает один виток, распределяется по внешней поверхности стенки резервуара на ширину диаметра проволоки и расстояния между витками.

Переменное внутреннее давление нефти на стенки резервуара определялось численно. На рис. 2 показано распределение внутреннего давления в резервуаре, заполненном сырой нефтью до максимального уровня. Максимальное давление, действующее в месте стыка стенки резервуара с дном, составляет 92,4 кПа.

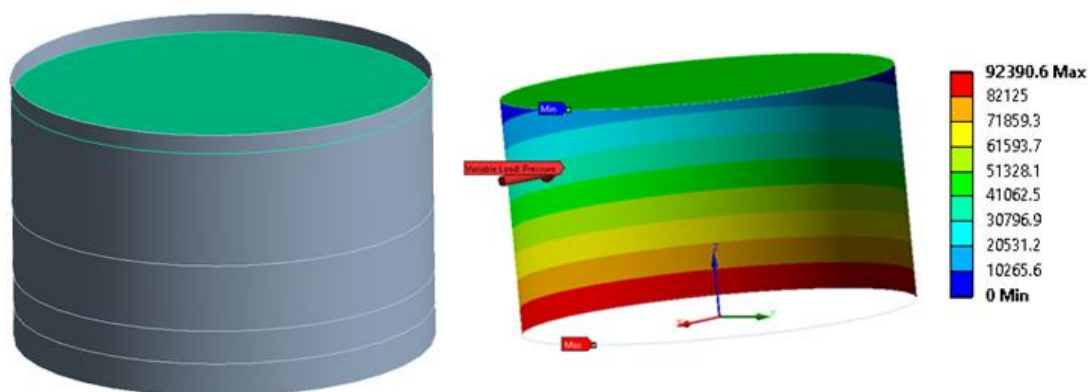


Рисунок 2 – Схема распределения давления на внутренней поверхности, максимально заполненной сырой нефтью резервуара

На рис. 3 показано распределение внутреннего давления в наполовину заполненном сырой нефтью резервуаре.

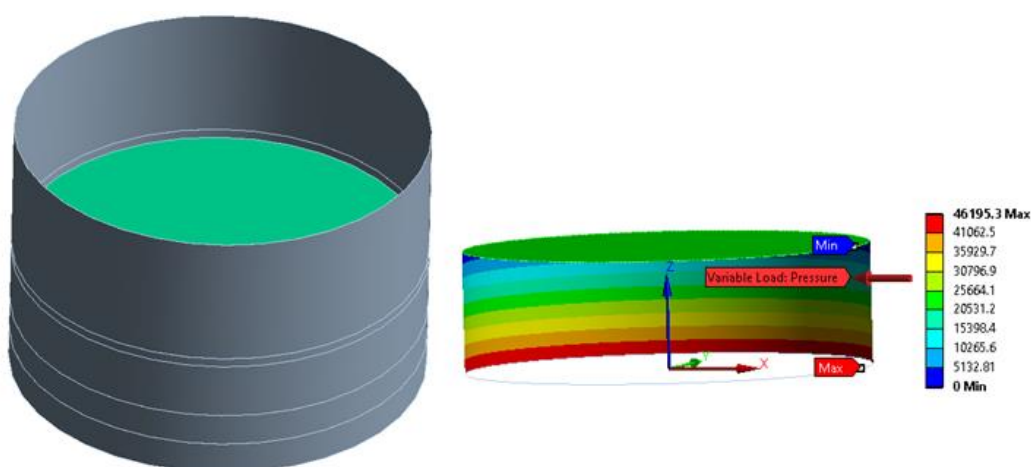


Рисунок 3 – Схема распределения давления на внутренней поверхности, наполовину заполненной сырой нефтью резервуара

Очевидно, что снижение высоты налива жидкости вдвое приводит к понижению максимального давления также вдвое. При этом верхняя граница жидкости находится на третьем поясе толщиной в 5 мм для Модели 2, а четвертый пояс остается ненагруженным.

В данном исследовании рассматривалась сырая нефть с плотностью 850 кг/м³.

Результаты и обсуждение

Для проверки достоверности результатов численных исследований определялось НДС конструкции для обеих моделей при равномерно распределенном по всей внутренней поверхности стенки давлении 100 кПа. Проверка степени достоверности результатов осуществлялась с помощью ряда тестовых расчетов. Для Модели 1 со стенкой постоянной толщины сходимость решения для перемещений достигается уже при размере элемента в 0,4 м. Для деформаций решение сходится при размере элемента в 0,2 м. А для получения достоверных результатов для напряжений нужно использовать размер элемента 0,1 м или 0,05 м. Относительная погрешность результата для напряжений при разбивке конечно-элементной сеткой с шагом 0,2 м и 0,1 м составляет 2,7%. А относительная погрешность результата по напряжениям при разбивке конечно-элементной сеткой с шагом 0,1 м и 0,05 м составляет 0,3%. Однако, количество элементов при разбивке конечно-элементной сеткой с шагом 0,05 м увеличивается в четыре раза по сравнению с разбивкой с шагом 0,1 м. Такое существенное увеличение количества элементов влечет за собой значительный рост машинного времени при решении задач. Для Модели 2 со стенкой переменной толщины близкие значения были получены при расчетах с максимальным размером конечного элемента 0,1 м и 0,05 м. Относительная погрешность результатов для напряжений составляет 0,4 %. При этом количество элементов при разбивке конечно-элементной сеткой с шагом 0,05 м увеличивается в девять раз по сравнению с разбивкой с шагом 0,1 м. Поэтому, все приведенные ниже исследования проводились на конечно-элементной сетке с максимальным размером конечного элемента 0,1 м.

Проведены исследования НДС стального вертикального цилиндрического резервуара с предварительно-напряженной обмоткой при эксплуатационных нагрузках для двух трехмерных моделей с равной массой. В качестве эксплуатационных нагрузок рассматривались случаи полного и половинного заполнения резервуара жидкостью, а также случай резервуара без жидкости. Моделировались три варианта создания предварительных напряжений в конструкции. Для первого варианта обмотка наносилась с одним интервалом в длину диаметра нити между витками (1:1), для второго – с двойным интервалом (1:2), а для третьего – с тройным интервалом (1:3). Сводные результаты численного анализа максимальных эквивалентных напряжений для резервуара с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные значения напряжений в резервуаре с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки при эксплуатационных нагрузках

Модель резервуара	Условия нагружения	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			
		обмотка с шагом 1:1	обмотка с шагом 1:2	обмотка с шагом 1:3	без обмотки
Резервуар со стенкой постоянной толщины	Резервуар максимально заполнен жидкостью	138,03	94,06	104,79	176,37
	Резервуар наполовину заполнен жидкостью	132,59	88,61	66,72	83,57
	Резервуар пустой	145,15	96,70	72,57	0,98
Резервуар со стенкой переменной толщины	Резервуар максимально заполнен жидкостью	165,58	110,63	83,27	119,5
	Резервуар наполовину заполнен жидкостью	167,16	111,45	83,73	49,1
	Резервуар пустой	166,87	111,17	83,43	0,63

А сводные результаты численного анализа максимальных эквивалентных напряжений для резервуара с предварительно-напряженной обмоткой из гладкой композитной нити представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Максимальные значения напряжений в резервуаре с предварительно-напряженной обмоткой из гладкой композитной нити при эксплуатационных нагрузках

Модель резервуара	Условия нагружения	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			
		обмотка с шагом 1:1	обмотка с шагом 1:2	обмотка с шагом 1:3	без обмотки
Резервуар со стенкой постоянной толщины	Резервуар максимально заполнен жидкостью	190,82	129,2	98,47	176,37
	Резервуар наполовину заполнен жидкостью	185,40	123,76	93,03	83,57
	Резервуар пустой	203,33	135,42	101,57	0,98
Резервуар со стенкой переменной толщины	Резервуар максимально заполнен жидкостью	231,57	154,55	116,15	119,5
	Резервуар наполовину заполнен жидкостью	234,09	155,97	117,04	49,1
	Резервуар пустой	233,76	155,68	116,76	0,63

Таким образом, получено НДС упрочненного стального вертикального цилиндрического резервуара с предварительно-напряженной обмоткой шести видов при эксплуатационных нагрузках. Анализ результатов позволяет сделать выбор наиболее эффективной обмотки для обеспечения сейсмостойкости конструкции.

На рис. 4 представлены эквивалентные напряжения по Мизесу для резервуара с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки с шагом обмотки 1:3 при максимальном заполнении жидкостью для Модели 1 и для Модели 2. А на рис. 5 представлены аналогичные результаты для обмотки из гладкой композитной нити. Анализ результатов показывает, что учет изменения толщины стенки резервуара существенно меняет распределение напряжений в конструкции.

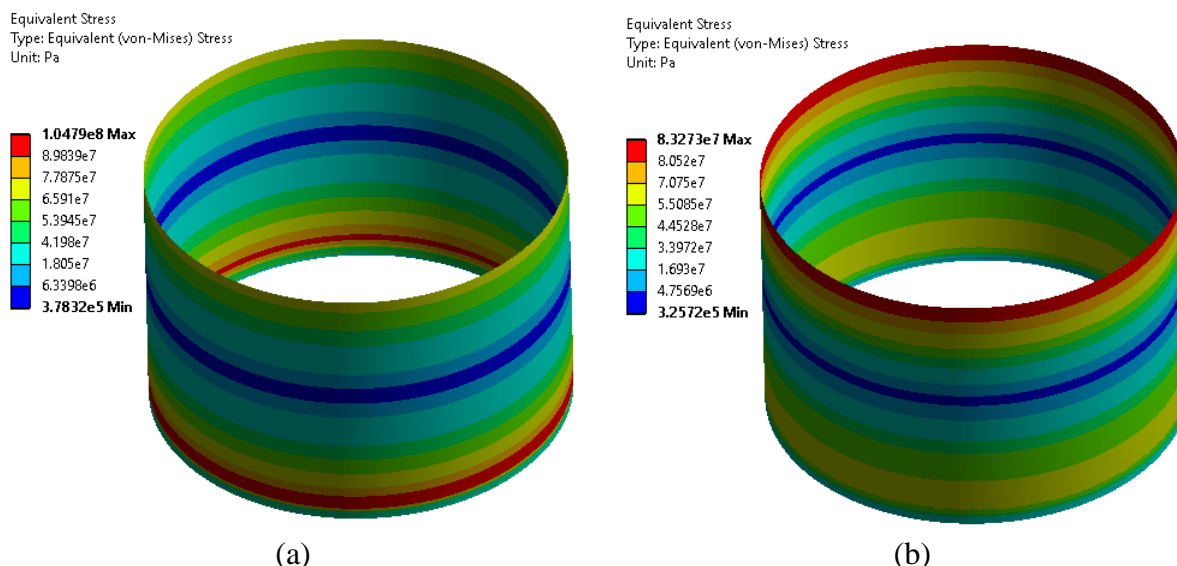


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения по Мизесу для резервуара с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки с шагом обмотки 1:3 при максимальном заполнении жидкостью: (а) со стенкой постоянной толщины; (б) со стенкой переменной толщины

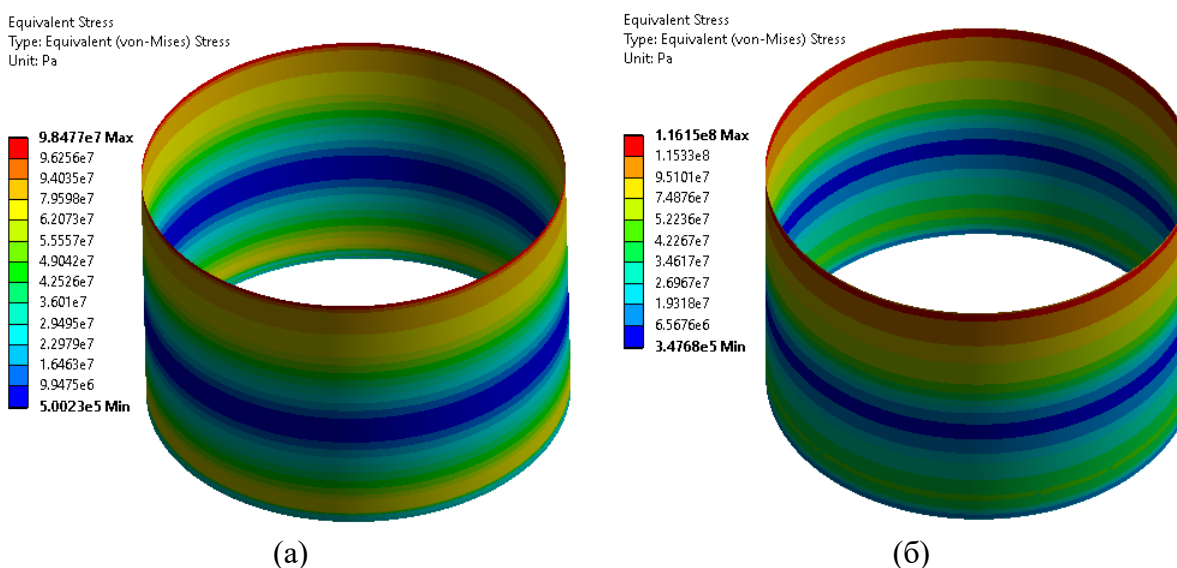


Рисунок 5 – Эквивалентные напряжения по Мизесу для резервуара с предварительно-напряженной обмоткой из гладкой композитной нити с шагом обмотки 1:3 при максимальном заполнении жидкостью: (а) со стенкой постоянной толщины; (б) со стенкой переменной толщины.

Также были исследованы для Модели 1 и для Модели 2 собственные частоты незаполненного жидкостью резервуара с шестью видами обмотки. Анализ результатов показал, что абсолютная разница для первых собственных частот колебаний не превышает одну десятую Герца. Поэтому далее приводятся результаты, полученные при расчетах по Модели 2. Рассматривались первые шестьдесят частот. Все они являются парными и характеризуются большим количеством узлов в окружном направлении по свободному краю. В табл. 3 приведены результаты первых десяти значащих частот резервуара.

Таблица 3 – Собственные частоты резервуара с обмоткой разного типа

№ частоты	Резервуар без обмотки	Резервуар с обмоткой из стальной проволоки			Резервуар с обмоткой из композитной нити		
		(1:1)	(1:2)	(1:3)	(1:1)	(1:2)	(1:3)
1	2,3371	2,766	2,6265	2,552	2,4211	2,399	2,3873
2	2,3573	2,790	2,667	2,6244	2,4395	2,4045	2,388
3	2,4358	2,953	2,7457	2,6375	2,5561	2,5298	2,506
4	2,5275	2,9757	2,9105	2,8432	2,5778	2,5457	2,5408
5	2,6258	3,2805	2,985	2,8956	2,8067	2,746	2,7157
6	2,8805	3,4028	3,313	3,1383	2,880	2,8794	2,8794
7	2,8845	3,673	3,4053	3,4121	3,1036	3,030	2,9936
8	3,1959	4,133	3,708	3,501	3,4381	3,367	3,324
9	3,4618	4,1865	4,16	3,9156	3,453	3,4452	3,449
10	3,5488	4,647	4,2231	4,2467	3,844	3,7457	3,6964

Собственные формы колебаний резервуара с обмоткой для всех шести рассмотренных случаев и для резервуара без обмотки однотипны. Они отличаются только количеством узлов в окружном направлении по свободному краю. В качестве примера на рис. 6 показана первая собственная форма колебаний резервуара с обмоткой и без нее.

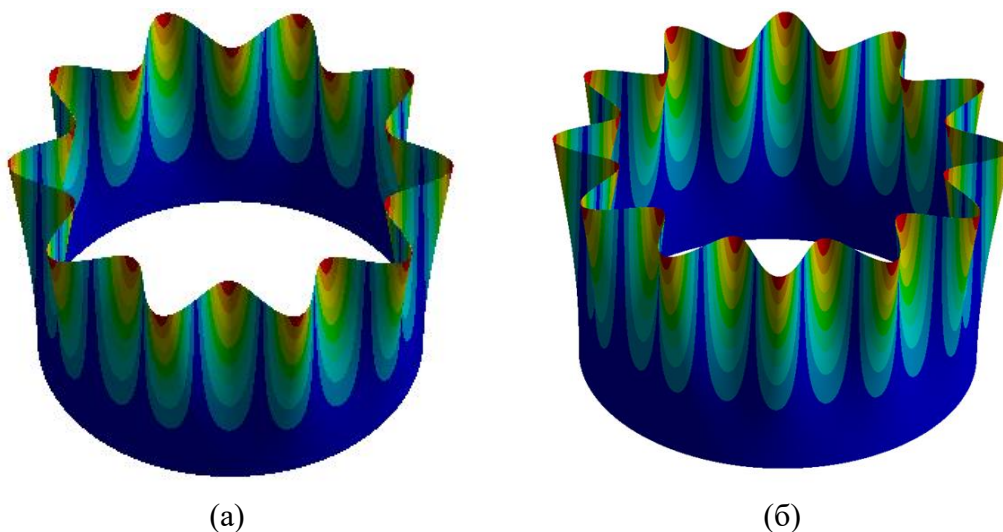


Рисунок 6 – Первая собственная форма колебаний резервуара (а) с предварительно-напряженной обмоткой из высокопрочной стальной проволоки с шагом 1:3; (б) без обмотки.

При нанесении обмотки изменяется масса резервуара. В табл. 4 представлены расчетные значения массы резервуара с обмоткой из шести рассмотренных вариантов и без обмотки.

Таблица 4 – Собственные частоты резервуара с обмоткой разного типа.

Масса, т	Резервуар без обмотки	Резервуар с обмоткой из стальной проволоки			Резервуар с обмоткой из композитной нити		
		(1:1)	(1:2)	(1:3)	(1:1)	(1:2)	(1:3)
	27,023	37,836	34,214	32,430	28,969	28,321	27,996

Расчеты проводились в предположении, что стальная проволока имеет предел текучести $\sigma_{0,2}=785$ МПа, а гладкая композитная нить имеет предел прочности $\sigma_B=1100$ МПа. Диаметр обмотки – 4 мм. Величина силы натяжения обмотки принималась равной 75% от предельного значения.

Исследована прочность вертикального цилиндрического стального резервуара для нефти с обмоткой из стальной проволоки или композитной нити при эксплуатационных нагрузках. Проводилась оценка влияния типа обмотки на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара, заполненного нефтью до заданного уровня. Оценка напряжений в стенке резервуара проводилась в зависимости от уровня налива нефти, шага наматывания обмотки и механических характеристик нити. Исследовались случаи полного, половинного заполнения резервуара нефтью и без нефти. Исследования проводились численными методами на основе конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS. Проведен анализ сходимости полученного решения задачи.

Рассмотрены две расчетные модели резервуара. Первая модель построена на упрощенной геометрической модели стенки резервуара с постоянной толщиной. Вторая модель учитывает изменение толщины стенки по высоте резервуара на 1÷2 мм. Проведен сравнительный анализ результатов расчета НДС резервуара по обеим моделям. Они показали, что упрощение геометрической модели приводит к существенной погрешности по напряжениям (рис. 4, 5). Поэтому рекомендуется использовать точную геометрическую модель для численного анализа прочности конструкции.

Моделировалось шесть вариантов обмотки. Рассматривалась обмотка из высокопрочной стальной проволоки и из композитной нити с одним интервалом между витками, с двойным интервалом и с тройным интервалом. Получено, что при обмотке стенки резервуара стальной проволокой с тройным интервалом максимальные напряжения в конструкции не превышают 34,2 % предела текучести (табл. 1). При этом высота налива нефти существенно не влияет на её прочность (табл. 1). Использование композитной нити приводит к росту максимальных напряжений до 47,2 % от предела текучести (табл. 2), но позволяет снизить массу резервуара с обмоткой (табл. 4). При обмотке композитной нитью с тройным интервалом масса конструкции увеличивается всего на 3,6% (табл. 4). Отметим, что для всех расчетных случаев (табл. 1, 2) процесс деформирования в конструкции, вызванный эксплуатационными нагрузками, протекает в упругой стадии. Установлено, что нанесение обмотки на стенку резервуара существенно влияет на характер напряженного состояния конструкции. Напряжения на внешней поверхности стенки, вызванные затягиванием обмотки, компенсируют напряжения, вызванные давлением нефти на внутреннюю поверхность стенки. При этом для всех вариантов обмотки опасные зоны концентрации напряжений в конструкции отсутствуют.

Исследовались собственные частоты незаполненного жидкостью резервуара с шестью видами обмотки для Модели 1 и для Модели 2 (табл. 3, рис. 6). Получено, что упрощение геометрической модели существенно не влияет на соб-

ственные частоты колебаний резервуара с обмоткой. При этом в резервуаре с обмоткой уменьшается количеством узлов в окружном направлении по свободному краю, по сравнению с резервуаром без обмотки (рис. 6).

Продолжением представленных исследований может быть анализ прочностных характеристик резервуара с нефтью при сейсмических нагрузках. Проведенные исследования могут быть расширены на задачу упругопластического деформирования конструкции.

Заключение

По полученным результатам исследований можно сделать выводы, что:

– при численных исследованиях прочности стального вертикального цилиндрического резервуара для нефти необходимо использовать трехмерную геометрическую модель, которая учитывает изменение толщины стенки вдоль образующей цилиндра на $1 \div 2$ мм. Упрощение геометрической модели приводит к существенной погрешности в результатах расчета;

– эксплуатационные нагрузки вызывают зоны концентрации напряжений в резервуарах, которые отсутствуют у резервуаров с обмоткой. Нанесение обмотки на стенки резервуара существенно меняет характер распределения напряжений. Напряжения, вызванные затягиванием обмотки, компенсируют напряжения, вызванные давлением нефти на стенку резервуара;

– для шести рассмотренных вариантов обмотки максимальные эквивалентные напряжения в конструкции возникают при обмотке стальной проволокой с шагом 1:3. При этом высота налива нефти существенно не влияет на их значения. Использование композитной нити позволяет снизить массу резервуара с обмоткой. При обмотке композитной нитью с шагом 1:3 масса конструкции увеличивается несущественно;

– формы свободных колебаний резервуара без обмотки и с обмоткой качественно не изменяются и характеризуются большим количеством узлов в окружном направлении по свободному краю.

Литература:

1. Li, Z., Song B., Li, D. (2022) *Safety Risk Recognition Method Based on Abnormal Scenarios. Buildings.* 12(5), 562. <https://doi.org/10.3390/buildings12050562>
2. Suleimenov, U., Zhangabay, N., Utelbayeva, A., Masrah A., Dosmakanbetova A., Abshenov K., Baganova S., Moldagaliyev A., Imanaliyev K., Duissenbekov B. (2022) *Estimation of the strength of vertical cylindrical liquid storage tanks with dents in the wall. Eastern – European Journal of enterprise technologie.* 7 (115), 6-20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252599>
3. Tursunkululy T., Zhangabay N., Avramov K., Chernobryvko M., Suleimenov U., Utelbayeva A., Duissenbekov B., Aikozov Y., Dauitbek B., Abdimanat Z. (2022) *Strength analysis of prestressed vertical cylindrical steel oil tanks under operational and dynamic loads. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2(7 (116), 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254218>
4. Suleimenov U., Zhangabay N., Utelbayeva A., Ibrahim M. N., Moldagaliyev A., Abshenov K., Baganova S., Daurbekova S., Ibragimova Z., Dosmakanbetova A. (2021) *Determining the features of oscillations in prestressed pipelines. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 6 (114), 85–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246751>

5. Fan Y., Hunt J., Wang Q., Yin Sh., Li Y. (2019) Water tank modelling of variations in inversion breakup over a circular city. *Building and Environment*. 164, 106342. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106342>
6. Martynenko G., Avramov K., Martynenko V., Chernobryvko M., Tonkonozhenko A., Kozharin V. (2021) Numerical simulation of warhead transportation. *Defence Technology*. 17(2), 478–494. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.005>
7. Wang Zh., Hu K., Zhao Y. Doom-roof steel tanks under external explosion: (2022) Dynamic responses and anti-explosion measures. *J. of Constructional Steel Research*. 190, 107118. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107118>
8. Rastgar M., Showkati H. (2018) Buckling behavior of cylindrical steel tanks with concavity of vertical weld line imperfection. *J. of Constructional Steel Research*. 145, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.028>
9. Thongchom C.; Jearsiripongkul T.; Refahati N.; Roudgar Saffari, P.; Roodgar Saffari, P.; Sirimontree, S.; Keawsawasvong, S. (2022) Sound Transmission Loss of a Honeycomb Sandwich Cylindrical Shell with Functionally Graded Porous Layers. *Buildings*. 12(2), 151. <https://doi.org/10.3390/buildings12020151>
10. Avramov K.; Chernobryvko M.; Uspensky B.; Seitkazenova K.; Myrzaliyev D. (2019) Self-sustained vibrations of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite cylindrical shell in supersonic flow. *Nonlinear Dynamics*. 98(3). 1853-1876. <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05292-z>
11. Kou S.; Zhang X.; Li W.; Song C. (2022) Dynamic Response Parameter Analysis of Steel Frame Joints under Blast Loading. *Buildings*. 12, 433. <https://doi.org/10.3390/buildings12040433>
12. Wang J.; Kusunoki K. (2022) Study on the Flexural Strength of Interior Thick Wall-Thick Slab Joints Subjected to Lateral Force Using Finite-Element Analysis. *Buildings*. 12, 535. <https://doi.org/10.3390/buildings12050535>
13. Idesman A.; Bhuiyan A.; Foley J. (2017) Accurate finite element simulation of stresses for stationary dynamic cracks under impact loading. *Finite Elements in Analysis and Design*. 126, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2016.12.004>
14. Sliwa A.; Kwasny W.; Nabialek M.; Dziwis R. (2019) Numerical analysis of static tensile test of the sample made of polyethylene reinforced by halloysite nanoparticles. *Acta Physica Polonica*. 136(6), 996–1000. <https://doi.org/10.12693/APHYSPOLA.136.996>
15. Avramov K., Chernobryvko M., Kazachenko O., Batutina T. (2016) Dynamic instability of parabolic shells in supersonic gas stream. *Meccanica*. 51(4), 939–950. <https://doi.org/10.1007/S11012-015-0247-4>
16. Zhangabay N., Utebayeva A. Patent for utility model for No. 6208 dated 02.07.2021 Cylindrical shell for storage and transportation liquids and hydrocarbons. <https://gosreestr.kazpatent.kz>

References:

1. Li, Z., Song B., Li, D. (2022) Safety Risk Recognition Method Based on Abnormal Scenarios. *Buildings*. 12(5), 562. <https://doi.org/10.3390/buildings12050562>
2. Suleimenov, U., Zhangabay, N., Utebayeva, A., Masrah A., Dosmakanbetova A., Abshenov K., Baganova S., Moldagaliyev A., Imanaliyev K., Duissenbekov B. (2022) Estimation of the strength of vertical cylindrical liquid storage tanks with dents in the wall. *Eastern – European Journal of enterprise technologie*. 7 (115), 6-20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252599>
3. Tursunkululy T., Zhangabay N., Avramov K., Chernobryvko M., Suleimenov U., Utebayeva A., Duissenbekov B., Aikozov Y., Dauitbek B., Abdimanat Z. (2022) Strength analysis of prestressed vertical cylindrical steel oil tanks under operational and dynamic loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2(7 (116), 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254218>

4. Suleimenov U., Zhangabay N., Utelbayeva A., Ibrahim M. N., Moldagaliyev A., Abshenov K., Buganova S., Daurbekova S., Ibragimova Z., Dosmakanbetova A. (2021) Determining the features of oscillations in prestressed pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6 (114), 85–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246751>
5. Fan Y., Hunt J., Wang Q., Yin Sh., Li Y. (2019) Water tank modelling of variations in inversion breakup over a circular city. *Building and Environment*. 164, 106342. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106342>
6. Martynenko G., Avramov K., Martynenko V., Chernobryvko M., Tonkonozhenko A., Kozharin V. (2021) Numerical simulation of warhead transportation. *Defence Technology*. 17(2), 478–494. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.005>
7. Wang Zh., Hu K., Zhao Y. *Doom-roof steel tanks under external explosion: (2022) Dynamic responses and anti-explosion measures. J. of Constructional Steel Research*. 190, 107118. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107118>
8. Rastgar M., Showkati H. (2018) Buckling behavior of cylindrical steel tanks with concavity of vertical weld line imperfection. *J. of Constructional Steel Research*. 145, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.028>
9. Thongchom C.; Jearsiripongkul T.; Refahati N.; Roudgar Saffari, P.; Roodgar Saffari, P.; Sirimontree, S.; Keawsawasvong, S. (2022) Sound Transmission Loss of a Honeycomb Sandwich Cylindrical Shell with Functionally Graded Porous Layers. *Buildings*. 12(2), 151. <https://doi.org/10.3390/buildings12020151>
10. Avramov K.; Chernobryvko M.; Uspensky B.; Seitkazenova K.; Myrzaliyev D. (2019) Self-sustained vibrations of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite cylindrical shell in supersonic flow. *Nonlinear Dynamics*. 98(3). 1853-1876. <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05292-z>
11. Kou S.; Zhang X.; Li W.; Song C. (2022) Dynamic Response Parameter Analysis of Steel Frame Joints under Blast Loading. *Buildings*. 12, 433. <https://doi.org/10.3390/buildings12040433>
12. Wang J.; Kusunoki K. (2022) Study on the Flexural Strength of Interior Thick Wall-Thick Slab Joints Subjected to Lateral Force Using Finite-Element Analysis. *Buildings*. 12, 535. <https://doi.org/10.3390/buildings12050535>
13. Idesman A.; Bhuiyan A.; Foley J. (2017) Accurate finite element simulation of stresses for stationary dynamic cracks under impact loading. *Finite Elements in Analysis and Design*. 126, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2016.12.004>
14. Sliwa A.; Kwasny W.; Nabialek M.; Dziwis R. (2019) Numerical analysis of static tensile test of the sample made of polyethylene reinforced by halloysite nanoparticles. *Acta Physica Polonica*. 136(6), 996–1000. <https://doi.org/10.12693/APHYSPOLA.136.996>
15. Avramov K., Chernobryvko M., Kazachenko O., Batutina T. (2016) Dynamic instability of parabolic shells in supersonic gas stream. *Meccanica*. 51(4), 939–950. <https://doi.org/10.1007/S11012-015-0247-4>
16. Zhangabay N., Utelbayeva A. Patent for utility model for No. 6208 dated 02.07.2021 Cylindrical shell for storage and transportation liquids and hydrocarbons. <https://gosreestr.kazpatent.kz>

Т. Түрсүнкүлүлы¹, Н. Жаңабай^{1*}, С. Буганова², С. Даурбекова²

¹КАҚ М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан Университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан

²Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

Информация об авторах:

Түрсүнкүлүлы Тимур – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Құрылыс және құрылыс материалдары» кафедрасының докторанты

<https://orcid.org/0000-0001-6215-7677>, email:timurtursunkululy@gmail.com

Жаңабай Нұрлан – докторант жетекшісі, техника ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Құрылыс және құрылыс материалдары» кафедрасының доценті

<https://orcid.org/0000-0002-8153-1449>, email: Nurlan.zhanabay777@mail.ru

Буганова Светлана – техника ғылымдарының кандидаты, «Құрылыс технологиялары, инфрақұрылым және менеджмент» факультетінің доценті, Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0003-2005-3305>, email: Svetlanabuganova7@gmail.com

Даурбекова Салтанат – техника ғылымдарының кандидаты, «Құрылыс технологиялары, инфрақұрылым және менеджмент» факультетінің доценті, Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0003-2353-8930>, email: Salta_daur@mail.ru

ОРАМАМЕН ҚАТАЙТЫЛҒАН МҰНАЙ ЖӘНЕ МҰНАЙ ӨНІМДЕРІНЕ АРНАЛҒАН ТІК ЦИЛИНДРЛІК БОЛАТ РЕЗЕРВУАР

Аннотация. Мақалада резервуарды мұнаймен және мұнайсыз әр түрлі толтыру жағдайлары зерттелген. Ораманың үш нұсқасы модельденді: бұрылыстар арасындағы бір интервалмен, екі интервалмен және үш интервалмен. Ораманың екі түрі қарастырылды: жоғары берік болат сымнан және композициялық жіптен. Үш еселік интервалы бар болат сыммен орау кезінде конструкциядағы кернеу аққыштық шегінің 34,2%-нан аспайтыны алынды. Сонымен қатар, мұнай құюдың биіктігі оның беріктігіне айтарлықтай әсер етпейді. Композиттік ораманы пайдалану кернеудің кірістілік шегінен 47,2%-ға дейін өсуіне әкеледі, бірақ орамасы бар резервуардың массасын азайтуға мүмкіндік береді. Композитті орамамен оралған кезде құрылымның массасы тек 3,6% артады.

Түйін сөздер: тік цилиндрлік болат резервуар, алдын-ала кернеу, жұмыс жүктемесі, орам қадамы, қабықтың кернеулі күйі, кернеуді локализациялау, соңғы элемент әдісі.

T. Tursunkululy¹, N. Zhangabay^{1*}, S. Buganova², S. Daurbekova²

¹South-Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan

²International Education Corporation (KazGASA), Almaty, Kazakhstan

Information about authors:

Timur Tursunkululy – Doctoral student, Department Construction and construction materials. South-Kazakhstan University named after M. Auezov

<https://orcid.org/0000-0001-6215-7677>, email: timurtursunkululy@gmail.com

Nurlan Zhangabay – head of the doctoral student, PhD, Associate Professor,

Department «Construction and construction materials» South-Kazakhstan University named after M. Auezov

<https://orcid.org/0000-0002-8153-1449>, email: Nurlan.zhanabay777@mail.ru

Buganova Svetlana – PhD, associate professor, Department of Building Technologies, Infrastructure and Management International Education Corporation

<https://orcid.org/0000-0003-2005-3305>, email: Svetlanabuganova7@gmail.com

Daurbekova Saltanat – PhD, associate professor, Department of Building Technologies, Infrastructure and Management International Education Corporation

<https://orcid.org/0000-0003-2353-8930>, email: Salta_daur@mail.ru

A PROPOSED MODEL OF VERTICAL CYLINDRICAL STEEL OIL TANKS WITH REINFORCING WINDING

Abstract. The article investigated cases of different filling of the tank with oil and without oil. Three winding options were modeled: with one interval between turns, with a double interval and with a triple interval. Two types of winding were considered: from high-strength steel wire and from composite thread. It is found that when wound with a steel wire with a triple interval, the stresses in the structure do not exceed 34.2% of the yield strength. At the same time, the height of the oil filling does not significantly affect its strength. The use of a composite thread leads to an increase in stresses up to 47.2% of the yield strength, but allows you to reduce the weight of the tank with the winding. When winding with a composite thread with a triple interval, the mass of the structure increases by only 3.6%.

Keywords: vertical cylindrical steel tank, prestress, workloads, winding step, stress-strain state of the shell, stress localization, finite element method.