



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2021, ТОМ 27, НОМЕР 3, 171–184
УДК 624.047.2:534.1

(21)-0430-1

ОСОБЕННОСТИ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА

М. Н. Цепляев

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.
E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru*

Получена 08 сентября 2021; принята 11 сентября 2021.

Аннотация. В работе рассмотрены различные аспекты определения собственных колебаний конструкций вертикальных стальных цилиндрических резервуаров в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4. На основании обзора литературы подтверждена актуальность изучения вопроса. Приведено обоснование применения метода конечных элементов для выполнения модального анализа как наиболее перспективного. Определены варьируемые параметры конечно-элементной модели. Выполнен расчёт частоты собственных колебаний для различных вариантов модели резервуара объёмом 20 тыс. м³. Получены первые формы собственных колебаний для конструкции в целом. Выявлены формы колебаний, не отвечающие реальной работе конструкции. Определены параметры численной модели резервуара, значительно влияющие на результат модального анализа. Используя полученный массив данных, получены рекомендуемые параметры конечно-элементной модели резервуара для расчёта частоты и форм собственных колебаний.

Ключевые слова: модальный анализ, оболочка, колебания, резервуар, собственные частоты, собственные формы.

ОСОБЛИВОСТІ МОДАЛЬНОГО АНАЛІЗУ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ РЕЗЕРВУАРА

М. М. Цепляєв

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.
E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru*

Отримана 08 вересня 2021; прийнята 11 вересня 2021.

Анотація. У роботі розглянуті різні аспекти визначення власних коливань конструкцій вертикальних сталевих циліндричних резервуарів в розрахунковому комплексі ЛІРА-САПР 2015 R4. На підставі огляду літератури підтверджено актуальність вивчення питання. Наведено обґрунтування застосування методу скінченних елементів для виконання модального аналізу як найбільш перспективного. Визначено варійовані параметри кінцево-елементної моделі. Виконано розрахунок частоти власних коливань для різних варіантів моделі резервуара об'ємом 20 тис. м³. Отримано перші форми власних коливань для конструкції в цілому. Виявлено форми коливань, що не відповідають реальній роботі конструкції. Визначено параметри чисельної моделі резервуара, що значно впливають на результат модального аналізу. Використовуючи отриманий масив даних, отримані рекомендовані параметри кінцево-елементної моделі резервуара для розрахунку частоти і форм власних коливань.

Ключові слова: модальний аналіз, оболонка, коливання, резервуар, власні частоти, власні форми.

FEATURES OF MODAL ANALYSIS OF FINITE ELEMENT RESERVOIR MODEL

Maxim Tcepliaev

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru

Received 08 September 2021; accepted 11 September 2021.

Abstract. The paper considers various aspects of determining the natural vibrations of structures of vertical steel cylindrical tanks in the calculation complex LIRA-SAPR 2015 R4. Based on a literature review, the relevance of studying the issue was confirmed. The substantiation of the application of the finite element method for performing modal analysis, as the most promising, is given. The variable parameters of the finite element model are determined. The calculation of the frequency of natural vibrations for various versions of the model of a tank with a volume of 20 thousand m³ has been carried out. The first forms of natural vibrations were obtained for the structure as a whole. The vibration modes that do not correspond to the real work of the structure have been identified. The parameters of the numerical model of the reservoir, which significantly affect the result of modal analysis, are determined. Using the obtained data array, the recommended parameters of the finite element model of the reservoir for calculating the frequency and forms of natural oscillations are obtained.

Keywords: modal analysis, shell, vibrations, tank, natural frequencies, natural forms.

Введение

Вычисление амплитудно-частотных характеристик и определение форм колебаний является текущей задачей процесса проектирования механизмов, зданий и сооружений. Распространённой задачей для сферы промышленного и гражданского строительства является модальный анализ или вычисление частоты собственных колебаний конструкции. Безусловной является необходимость вычисления частоты собственных колебаний при проектировании башенных, большепролётных и уникальных сооружений. Для некоторых категорий объектов массового строительства возможно обойтись без модального расчёта, однако такой перечень весьма ограничен. В таких случаях как наличие сейсмического воздействия или поиск оптимального сечения, без вычисления частоты собственных колебаний не обойтись даже для объектов типового строительства. Исключением не являются и рассматриваемые в данной работе сооружения – стальные вертикальные цилиндрические резервуары (ВЦР). Пример такой конструкции изображён на рисунке 1.

Объём хранимого продукта в таких конструкциях варьируется от 500 до 50 тыс. м³. Исследо-

вание целесообразно выполнять для резервуаров объёмом 5 000–20 000 м³. получивших наибольшее распространение. Например, в Российской Федерации резервуаров такого объёма около 50 тысяч единиц [1]. Такие сооружения имеют сравнительно небольшой срок службы, следовательно, есть необходимость их регулярного обновления и ремонта. Определяющим воздействием при расчёте на прочность цилиндрической стенки резервуаров является гидростатическая и снеговая нагрузки. В свою очередь устойчивость стенки напрямую связана с ветровыми нагрузками. Как правило, толщины верхних поясов стенки определяются именно из расчёта на устойчивость. Полноценный расчёт ветровой нагрузки невозможен без модального анализа [2], а значит частота собственных колебаний является параметром, при правильном регулировании которого конструкция становится более экономичной.

На сегодняшний день в требованиях и рекомендациях по проектированию и расчёту резервуаров указаний по оптимальным частотам собственных колебаний не приводится. Отчасти это связано с большой трудоёмкостью выполнения модального анализа для таких конструкций как,



Рисунок 1. Вертикальный цилиндрический резервуар.

резервуары. Так как они являются пространственными объектами, их невозможно привести к упрощённой двумерной расчётной схеме без потери точности решения. Учёт стенки переменной толщины и других конструктивных особенностей является трудоёмким для ручного счёта. Использование метода конечных элементов (МКЭ) отчасти упрощает задачу модального анализа, однако возникает вопрос влияния особенностей моделирования на результаты расчёта. В данной работе будут рассмотрены варианты конечно-элементной модели резервуара и их влияние на значение частоты собственных колебаний. Исследование проводится в разрезе изучения параметров резервуара на частоту собственных колебаний.

1. Обзор литературы

1.1 Структура изучаемых вопросов

Рассматривая вопрос в историческом контексте, следует отметить, что существенный импульс для изучения колебаний оболочек был дан с началом развития ракетно-космической отрасли, а

именно с 50-х годов прошлого столетия [3]. В докомпьютерную эпоху основными были аналитические и экспериментальные методы исследования, позже к ним добавились численные с использованием конечно-элементного анализа. Тем не менее все три метода являются актуальными и активно применяются исследователями и сегодня.

Анализируя значительный объём работ по затронутой тематике, определяется структура изучаемых вопросов. Основным классифицирующим фактором является форма исследуемой конструкции. В данном обзоре будут рассмотрены работы, в которых представлены элементы, близкие по форме к вертикальным цилиндрическим резервуарам. Дальнейшая классификация определяется особенностями формы. В реальных конструкциях всегда присутствуют технологические люки, врезки, усиливающие кольца и другие детали, не позволяющие считать поверхность гладкой. При этом в работах И. Я. Амиро и А. С. Вольмира отмечено существенное влияние подкрепляющих элементов на собственные колебания оболочек в целом [3, 4]. При постановке динамических задач для оболочек с элементами жёсткости рассматривают две основные механические модели. Первая

из них основана на замене подкреплённой оболочки гладкой с эквивалентной толщиной (конструктивно-ортотропная модель), вторая - учитывает дискретное размещение ребер [6–8].

Пример использования конструктивно-ортотропной модели можно увидеть в работах [9, 10] при определении собственных частот колебаний и в ряде других динамических задачах. Результаты, полученные с использованием данной модели, обладают некоторыми погрешностями, но вполне применимы для практических расчётов. В реальных конструкциях резервуаров расположение ребер на стенках носит нерегулярный характер, соответственно использовать подобную модель не представляется возможным [11].

Основой дискретной модели является классическая теория оболочек Кирхгофа-Лява и уточнённая теория С. П. Тимошенко. Хотя некоторые авторы отмечают необходимость учитывать особенности использования таких моделей. Так, в работе В. М. Жгутова [12] показано, что в случае использования модели Кирхгофа-Лява в задачах динамики оболочек эффект инерции вращения учитывать нельзя. В противном случае оказываются некорректными соответствующие краевые условия.

Теоретические исследования частоты и формы собственных колебаний при дискретном размещении ребер приводят к существенному разнообразию расчетных схем и уравнений [13–15]. Преимущественно рассматриваются оболочки постоянной толщины с шарнирным закреплением краёв, что не полностью соответствует расчётной схеме резервуара. Говоря о трудоёмкости аналитических методов, рассмотрим выражение 1 для определения собственных колебаний цилиндрической оболочки по методу Рэлея-Ритца [16].

$$\begin{aligned} & \left(\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot R^2 \cdot (1-\nu^2)}{E} \right)^3 \cdot \omega^6 + \\ & + K2 \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot R^2 \cdot (1-\nu^2)}{E} \right)^2 \cdot \omega^4 + \quad (1) \\ & + K1 \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot R^2 \cdot (1-\nu^2)}{E} \right) \cdot \omega^2 + K0 = 0 \end{aligned}$$

Расчёт коэффициентов, входящих в выражение 1, является отдельной задачей. При этом выражение применимо только для цилиндрической оболочки постоянной толщины, закреплённой по торцам.

В многообразии работ, в которых исследуются колебания оболочек различных форм и параметров, есть общая особенность. Они в достаточной мере подойдут для изучения колебаний цилиндрической стенки, но не ВЦР в целом. Причиной тому является отсутствие учёта в применяемых математических моделях сферической кровли либо её эквивалента. Отдельные решения предполагают наличие осевой сжимающей нагрузки, но рассматриваемые в них параметры оболочек не соответствуют параметрам ВЦР. Так, исследования [7, 17] показали, что влияние начальных погибей в оболочках на собственные частоты колебаний незначительно до тех пор, пока величины сжимающих усилий далеки от критических значений. В целом вопрос корректности модального анализа при моделировании кровли в виде осевой нагрузки в указанных работах не решён. Общей чертой результатов исследований являются ограничения на применимость полученных решений и отсутствие универсальных алгоритмов.

Альтернативной рассмотренным выше методам, позволяющей частично компенсировать приведенные недостатки, является применение численных методов, в частности конечно-элементного анализа. Указанный метод расчета неоднородных оболочечных конструкций является одним из наиболее перспективных, в том числе и для модального анализа. В большинстве случаев полученные на нерегулярных сетках решения имеют высокое качество, что делает данный метод особенно удобным при решении динамических задач для конструкций сложной геометрической формы. При создании трёхмерной модели резервуара возможно учесть все особенности геометрии, включая дефекты и ступенчатую толщину стенки.

Возможность применения метода конечных элементов для решения динамических задач представлена, в работах О. Зенкевича [18], Мясченкова [19], Сахарова [20] и других. В последнее время МКЭ получил широкое использование для решения задач механики благодаря

развитию сертифицированных программных пакетов. На сегодня уже есть достаточное количество примеров, в том числе для оболочек по типу резервуаров [21, 22]. Однако в рассмотренных работах целью было получить решение для конкретной конструкции. При этом не приводится обоснование подбора параметров расчётной модели, соответственно, вопрос влияния особенностей моделирования на вычисляемую частоту собственных колебаний является актуальным для изучения.

1.2 Постановка целей и задач исследования

На основании изложенной в обзоре литературы проблематики целью данного исследования является: определение влияния особенностей моделирования конечно-элементной модели резервуара на результат модального анализа. Предмет исследования: частота собственных колебаний конструкций резервуаров. Объект исследования: вертикальные стальные цилиндрические резервуары объёмом хранимого продукта от 20 до 30 тыс. м³.

Основная задача исследования – выполнение модального анализа в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 при различных вариантах задания конструкции.

2. Методы

Общая последовательность исследования:

- 1) определение варьируемых параметров конечно-элементной модели ВЦР;
- 2) создание трёхмерных моделей в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 с особенностями, определёнными пунктом 1;
- 3) выполнение модального анализа для каждой модели;
- 4) сравнение результатов и получение выводов.

2.1 Описание рассматриваемой конструкции и применяемого расчётного комплекса

Исследования на данном этапе будут выполняться на примере резервуара объёмом 20 тыс. м³ диаметром 39 м и высотой стенки 18 м. Покрытие сферическое и опирается на ребристо-кольцевой купол выполненный из прокатных профилей. Толщины поясов стенки и поперечные

сечения других конструктивных элементов принимаются согласно типовому проекту [23]. Расположение колец жёсткости будет выполняться согласно рекомендациям, изложенным в работе [11]. Для выполнения модального анализа будет применяться расчётный комплекс ЛИРА-САПР 2015 R4. Применение данного расчётного комплекса обусловлено возможностью выполнения модального анализа и наличия верификационных расчётов [25].

2.2 Параметры конечно-элементных моделей ВЦР

Для всех моделей принята общая структура и принципы моделирования. Отличия заключаются в особенностях задания конкретных конструктивных элементов и закреплениях. Общие параметры моделей, включая принятые размеры КЭ, основаны на результатах исследования, изложенных в работах [11, 26, 27] и здесь будут приведены в сокращённом виде. Варьируемые параметры приняты исходя из практических соображений и актуальных вопросов создания трёхмерных моделей. К таковым можно отнести вопрос необходимости детального моделирования составляющих элементов.

Рассматривается пустой резервуар без учёта внешних воздействий. Единственной нагрузкой является собственный вес. Масса элементов задаётся в виде равномерно распределённой нагрузки по элементам схемы. Такое решение вызвано последующими задачами исследования, а именно комплексным изучением колебаний конструкции под действием ветровой нагрузки. При этом ветровая нагрузка для цилиндрической поверхности может быть задана только в распределённом виде. Для всех конечных элементов сосредоточение распределённых весов масс в узлах элемента производится программными средствами ЛИРА-САПР 2015 R4 в зависимости от типа конечного элемента и на основании соответствующих аппроксимирующих полиномов.

Для цилиндрической стенки применяется конечный элемент (КЭ) оболочки №41. Сетка конечных элементов определяется верификационным расчётом на прочность цилиндрической стенки.

В части конструктивных варьируемых параметров будет рассматриваться количество колец

жёсткости (КЖ) и закрепление (жёсткое либо шарнирное) стенки к днищу. Для резервуаров рассматриваемого объёма их количество, как правило, не превышает двух [11]. Опорные и промежуточные кольца жёсткости будут моделироваться в двух вариантах: пластинами либо в виде стержня с заданными характеристиками. Сферическая кровля задаётся в полноразмерном виде либо заменяется вертикальными и горизонтальными составляющими опорных реакций, действующих на опорное кольцо. Для случая полноразмерного моделирования несущая часть купола моделируется стержневыми элементами (КЭ №10), а покрытие - пластинчатыми конечными элементами (КЭ №41). Чтобы обеспечить адекватную работу узла, программными средствами выполняется объединение перемещений узлов. Сетка элементов покрытия подбирается таким образом, чтобы точно стыковаться с несущим каркасом.

Днище резервуара создано путём автоматической триангуляции с заданными параметрами области внутри окрайки днища. Здесь применялись прямоугольные КЭ №44, за исключением мест стыка днища со стенкой, где использовались треугольные КЭ №42.

В результате комбинации варьируемых параметров определены 16 вариантов расчётных схем, особенности которых приведены в таблице 1.

2.3 Процесс расчёта и обработки результатов

Для определения частоты собственных колебаний будут применяться стандартные возможности комплекса ЛИРА-САПР 2015 г4. Модальный анализ будет выполняться с учётом первой, наиболее вероятной, формы колебаний. Решения предлагается выполнять с применением матрицы масс одного из двух типов - диагональной или согласованной. Если веса масс заданы сосредоточенными в узлах схемы, то рекомендуется вести расчет задачи с диагональной матрицей масс. Для рассматриваемого в данной работе случая распределённых нагрузок рекомендуется применять второй вариант. Кроме того, согласованная матрица позволяет учесть влияние поступательных масс и на угловые степени свободы узлов схемы. Результатом расчётов будут полученные частоты собственных и формы собственных колебаний для случаев, приведенных в таблице. На основании полученных величин делается вывод

о влиянии особенностей моделирования резервуара при модальном анализе.

3. Результаты и обсуждение

Полученные значения старших величин собственных колебаний f , а также общий вид первой формы колебаний для каждой из рассматриваемых схем приведены в таблице 2. Форма колебаний изображена как в общем виде для всей конструкции резервуара, так и для цилиндрической стенки на уровне +9.000. Описание параметров каждой модели приведено в таблице 1.

Анализ результатов целесообразно проводить исходя из полученных значений частот колебаний и графического изображения формы колебаний. Для удобства анализа полученные результаты сгруппированы в зависимости от количества колец жёсткости в таблице 3.

Модели резервуаров следует рассматривать в зависимости от конструктивного решения, в частности от количества колец жёсткости. Исходя из данных в таблицах 2 и 3 разброс значений частоты собственных колебаний в зависимости от особенностей конечно-элементной модели составил (вне зависимости от условий закрепления днища):

- для резервуара без колец жёсткости 4,05 %;
- для резервуара с одним кольцом жёсткости 30,2 %;
- для резервуара с двумя кольцами жёсткости 40,8 %.

Во всех конструктивных вариантах максимальное расхождение наблюдается при упрощении расчётной схемы. Так, для моделей с двумя полноразмерными кольцами жёсткости при замене их стержнями результат отличается на 16 %. При дополнительной замене покрытия эквивалентными усилиями результат отличается более чем на 40 %. Для конструктивного варианта без колец жёсткости замена покрытия эквивалентными усилиями не приводит к столь существенным отличиям. Расхождение в зависимости от способа закрепления днища и способа моделирования опорного кольца варьируется в пределах 2...3 %. Следовательно, способ моделирования колец жёсткости в большей степени влияет на значение собственных колебаний. Интересной особенностью является незначительное влияние способа закрепления стенки с днищем, так для всех рассмотренных случаях величина

Таблица 1. Параметры конечно-элементных моделей

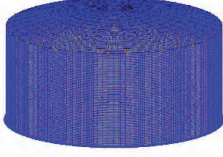
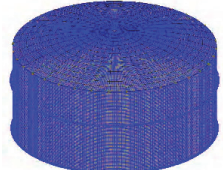
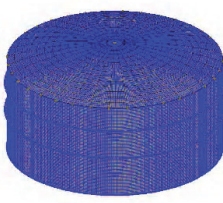
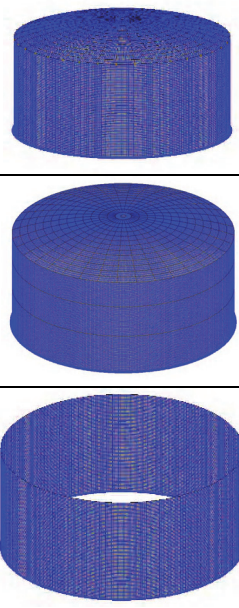
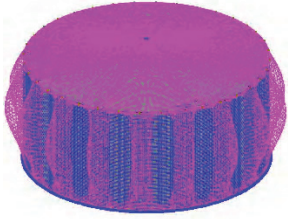
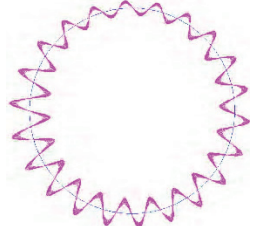
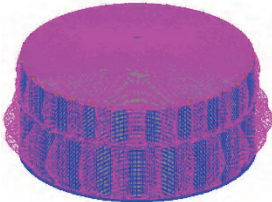

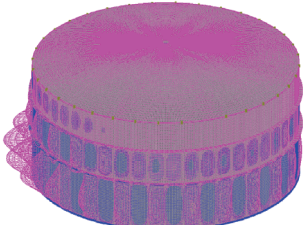
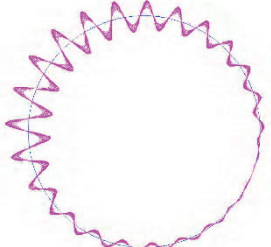
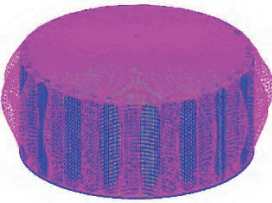

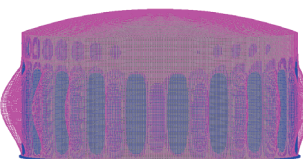
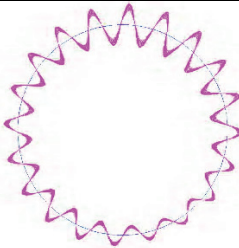
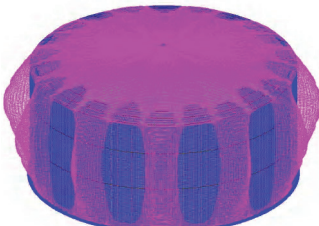
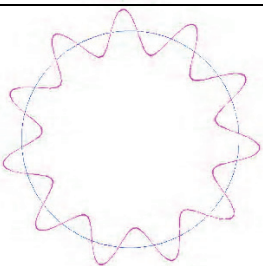
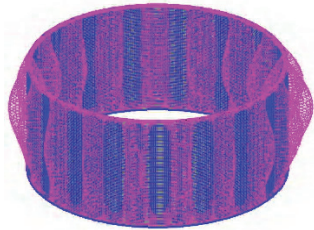
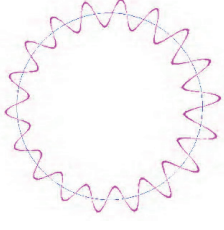
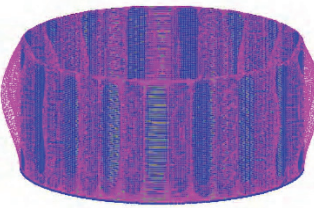

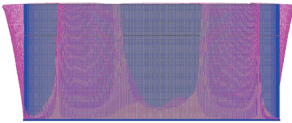
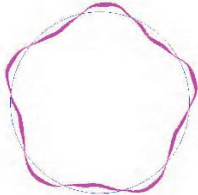
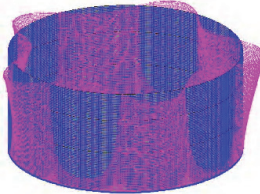
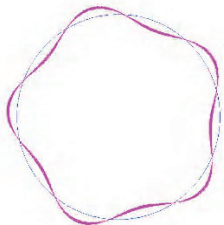
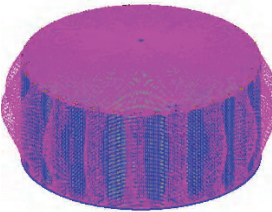
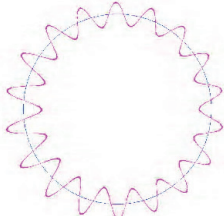
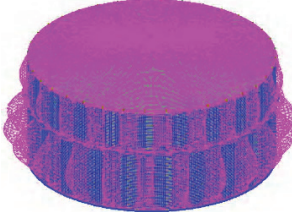
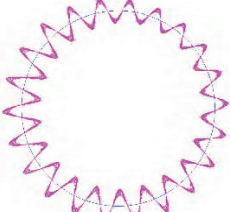
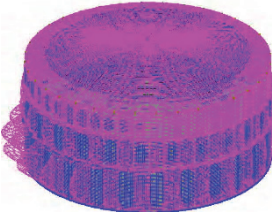

№ расчётной схемы	Моделирование:				Общий вид расчётной модели в комплексе ЛИРА-САПР 2015
	сферической кровли	опорного кольца	колец жёсткости	закрепления днища	
Схема 1	Полноразмерное	Пластинами КЭ 41, 42	Нет	Шарнирное	
Схема 2	Полноразмерное	Пластинами КЭ 41, 42	1 КЖ (пластинами КЭ 41, 42)	Шарнирное	
Схема 3	Полноразмерное	Пластинами КЭ 41, 42	2 КЖ (пластинами КЭ 41, 42)	Шарнирное	
Схема 4	Полноразмерное	Стержнями КЭ 10	нет	Шарнирное	
Схема 5	Полноразмерное	Стержнями КЭ 10	1 КЖ (стержнями КЭ 10)	Шарнирное	
Схема 6	Полноразмерное	Стержнями КЭ 10	2 КЖ (стержнями КЭ 10)	Шарнирное	
Схема 7	Составляющими опорных реакций	Пластинами КЭ 41, 42	нет	Шарнирное	
Схема 8	Составляющими опорных реакций	Стержнями КЭ 10	нет	Шарнирное	
Схема 9	Составляющими опорных реакций	Стержнями КЭ 10	1 КЖ (стержнями)	Шарнирное	
Схема 10	Составляющими опорных реакций	Стержнями КЭ 10	2 КЖ (стержнями)	Шарнирное	
Схема 11	Полноразмерное	Пластинами КЭ 41, 42	нет	Жёсткое	Аналогично модели 1
Схема 12	Полноразмерное	Пластинами КЭ 41, 42	1 КЖ (пластинами)	Жёсткое	Аналогично модели 2
Схема 13	Полноразмерное	Пластинами КЭ 41, 42	2 КЖ (пластинами)	Жёсткое	Аналогично модели 3
Схема 14	Полноразмерное	Стержнями КЭ 10	нет	Жёсткое	Аналогично модели 4
Схема 15	Полноразмерное	Стержнями КЭ 10	1 КЖ (стержнями)	Жёсткое	Аналогично модели 5
Схема 16	Полноразмерное	Стержнями КЭ 10	2 КЖ (стержнями)	Жёсткое	Аналогично модели 6

Таблица 2. Формы и частоты собственных колебаний

№ расчётной схемы	Частота собственных колебаний		Первая форма колебаний	
	f, рад/с	f, Гц	всей конструкции	стенки (разрез на уровне +9.000)
Схема 1	21,33	3,396		
Схема 2	37,541	5,978		
Схема 3	50,379	8,02		
Схема 4	20,677	3,29		
Схема 5	30,445	4,85		
Схема 6	42,365	6,746		

Продолжение таблицы 2

Схема 7	20,92	3,33		
Схема 8	20,547	3,272		
Схема 9	28,77	4,59		
Схема 10	39,02	6,32		
Схема 11	21,46	3,41		
Схема 12	37,33	5,944		
Схема 13	51,56	8,21		

Окончание таблицы 2

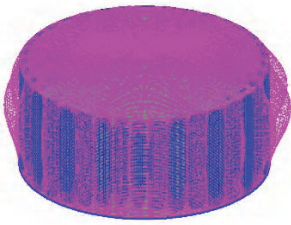
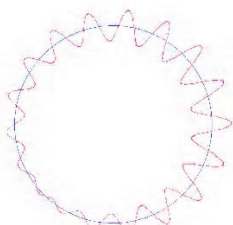
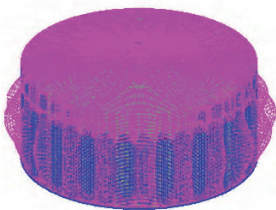
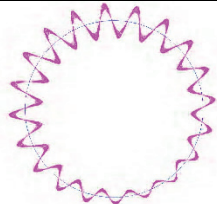
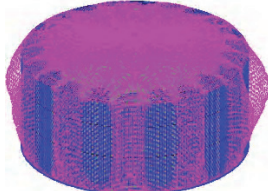
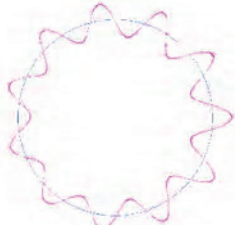
Схема 14	20,66	3,29		
Схема 15	30,43	4,85		
Схема 16	43,47	6,92		

Таблица 3. Результаты расчётов

Количество колец жёсткости					
0		1		2	
№ модели	f, Гц	№ модели	f, Гц	№ модели	f, Гц
1	3,396	2	5,978	3	8,02
4	3,29	5	4,85	6	6,746
7	3,33	9	4,59	10	4,583
8	3,272	12	5,94	13	8,21
11	3,41	15	4,85	16	6,92
14	3,29				

собственных колебаний менялась в пределах 2%. Отмечается также увеличение частоты собственных колебаний с повышением жёсткости стенки. Так, при усилении стенки двумя кольцами жёсткости частота колебаний ВЦР увеличивается приблизительно в 2,5 раза.

Анализируя полученную графическую информацию, можно отметить схожую форму колебаний для всех рассмотренных вариантов. Колебания стенки имеют явный волновой, преимущественно симметричный, характер. В свою очередь, амплитуда колебаний сферической кровли существенно меньшая по сравнению со стен-

кой и не прослеживается на изображениях схем, приведенных в таблице 2. Тем не менее для цилиндрической стенки амплитуда и частота колебаний существенно отличается у моделей с полноразмерной кровлей по сравнению с упрощённым вариантом моделирования. В случае отсутствия полноразмерной кровли колебания оболочки, даже с двумя кольцами жёсткости, выглядят как для оболочки с незакреплённым верхним торцом. В комплексе с имеющимися расхождениями в значениях частоты колебаний при упрощении расчётных схем можно сделать вывод о предпочтительной модели для модального

анализа. Следует отметить, что при проверочном расчёте напряжённо-деформированного состояния стенки резервуара кольца жёсткости, заданные стержнями, адекватно отображают поведение конструкции.

Выводы

На основании проведенного исследования установлено:

1. Задача определения частот собственных колебаний с использованием метода конечных элементов является наиболее перспективной, тем не менее, ряд вопросов реализации такого метода для конкретных сооружений остаётся малоизученным. В том числе и для стальных цилиндрических резервуаров.
2. Усиление цилиндрической стенки кольцами жёсткости существенно повышает частоту собственных колебаний резервуара в целом.
3. Различные варианты закрепления стенки к днищу, а также моделирования опорного кольца кровли приводят к незначительному от-

личию значений частоты собственных колебаний конструкции – до 3 %.

4. Форма собственных колебаний рассматриваемой конструкции резервуара в случае полноразмерного моделирования кровли наиболее полно отражает реальную работу конструкции.
5. Для моделей резервуаров с полноразмерными кольцами жёсткости, их замена стержневыми элементами приводит к изменению результатов расчёта в диапазоне 10...16 %. В комплексе с упрощённым моделированием сферического покрытия расхождения в результатах превышает 40%.
6. Для рассмотренной и аналогичных конструкций резервуаров при выполнении модального анализа с использованием комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 рекомендуется конечно-элементная модель резервуара с полноразмерным покрытием без замены колец жёсткости стержневыми элементами. Выполнение такой модели является более трудоёмким, однако она точнее отражает реальную работу конструкции.

Литература

1. Ценность резервуарного парка в России. – Текст : электронный // ЛКМ портал : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.lkmportal.com/infographics/8821> (дата обращения: 01.09.2021).
2. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 787 : взамен СНиП 2.01.07-85 : дата введения 2011-05-20 / подготовлен Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики. – Москва : Минстрой России, 2011. – 81 с. – Текст : непосредственный.
3. Ларин, А. А. Очерки истории развития теории механических колебаний / А. А. Ларин. – Севастополь : Вебер, 2013. – 403 с. – Текст : непосредственный.
4. Колебания ребристых оболочек вращения / И. Я. Амиро, В. А. Заруцкий, В. Н. Ревуцкий [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1988. – 172 с. – Текст : непосредственный.
5. Вольмир, А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А. С. Вольмир. – Москва : Наука, 1972. – 432 с. – Текст : непосредственный.
6. Андрианов, И. В. Асимптотические методы в строительной механике тонкостенных конструкций /

References

1. The value of the tank farm in Russia. – Text : electronic // LKM portal : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.lkmportal.com/infographics/8821> (date of the application: 01.09.2021). (in Russian)
2. SP 20.13330.2011. Loads and actions. - Moscow : Ministry of Construction and Housing and Communal Services of Russia, 2011. – 81 p. – Text : direct. (in Russian)
3. Larin, A. A. Essays on the history of the development of the theory of mechanical vibrations. – Sevastopol : Weber, 2013. – 403 p. – Text : direct. (in Russian)
4. Amiro, I. Ya.; Zarutsky, V. A.; Revutsky, V. N. [et. al.]. Vibrations of ribbed shells of revolution. – Kiev : Scientific thought, 1988. – 172 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Volmir, A. S. Nonlinear dynamics of plates and shells. – Moscow : Science, 1972. – 432 p. – Text : direct. (in Russian)
6. Andrianov, I. V.; Nerubaylo, B. V.; Obratstov, I. F. Asymptotic methods in structural mechanics of thin-walled structures. – Moscow : Mashinostroyeniye, 1991. – 416 p. – Text : direct. (in Russian)
7. Amiro, I. Ya.; Zarutsky, V. A. Methods for calculating shells. In 5 volumes. Volume 2. Theory of ribbed shells. – Kiev : Scientific thought, 1980. – 368 p. – Text : direct. (in Russian)

- И. В. Андрианов, Б. В. Нерубайло, И. Ф. Образцов. – Москва : Машиностроение, 1991. – 416 с. – Текст : непосредственный.
7. Амиро, И. Я. Методы расчета оболочек. В 5 томах. Том 2. Теория ребристых оболочек / И. Я. Амиро, В. А. Заруцкий. – Киев : Наукова думка, 1980. – 368 с. – Текст : непосредственный.
 8. Заруцкий, В. А. Приближенные формулы для вычисления минимальных собственных частот колебаний подкрепленных цилиндрических оболочек / В. А. Заруцкий. – Текст : непосредственный // Прикладная механика. – 1977. – Том 13, № 5. – С. 43–51.
 9. Андрианов, И. В. Метод усреднения в статике и динамике ребристых оболочек / И. В. Андрианов, В. А. Лесничая, Л. И. Маневич. – Москва : Наука, 1985. – 224 с. – Текст : непосредственный.
 10. Богданович, А. Е. Собственные колебания ортотропных ребристых цилиндрических оболочек / А. Е. Богданович, В. А. Заруцкий. – Текст : непосредственный // Прикладная механика. – 1991. – Том 27, № 10. – С. 83–90.
 11. Муцанов, В. Ф. Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жёсткости / В. Ф. Муцанов, М. Н. Цепляев. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 9(72). – С. 58–73.
 12. Жгутов, В. М. Нелинейные свободные колебания пологих оболочек ступенчато-переменной толщины : специальность 05.23.17 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жгутов Владимир Михайлович ; Петербургский государственный университет путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2004. – 177 с. – Текст : непосредственный.
 13. Малютин, И. С. Устойчивость и колебания цилиндрической оболочки, дискретно подкрепленной полирегулярной системой ребер. – Текст : непосредственный / И. С. Малютин // Труды X Всесоюз. конф. по теории пластин и оболочек. В 2 томах. – Тбилиси : Мецниереба. – 1975. – Т. 1. – С. 671–679.
 14. Телалов, А. И. Определение минимальной собственной частоты колебаний сферической оболочки с жестко присоединенной массой / А. И. Телалов. – Текст : непосредственный // Прикладная механика. – 1987. – Т. 23, № 7. – С. 103–105.
 15. Beskos, D. E. Dynamic analysis of ring-stiffened circular cylindrical shells / D. E. Beskos, J. B. Oates. – Текст : непосредственный // Journal of Sound and Vibration. – 1981. – Volume 75, № 1. – P. 1–15.
 16. Гонткевич, В. С. Собственные колебания ортотропных цилиндрических оболочек / В. С. Гонткевич. – Текст : непосредственный // Труды конференции по теории пластин и оболочек Казанского государственного университета. – 1961. – Выпуск 1. – С. 124–129.
 17. Кукарина, А. И. О влиянии начальных погибей на собственные колебания ребристых цилиндрических оболочек / А. И. Кукарина, В. И. Мацнер, 8. Zarutsky, V. A. Approximate formulas for calculating the minimum natural frequencies of vibrations of reinforced cylindrical shells. – Text : direct. – In: *Applied mechanics*. – 1977. – Volume 13, № 5. – P. 43–51. (in Russian)
 9. Andrianov, I. V.; Lesnichaya, V. A.; Manevich, L. I. Averaging method in statics and dynamics of ribbed shells. – Moscow : Science, 1985. – 224 p. – Text : direct. (in Russian)
 10. Bogdanovich, A. Ye.; Zarutsky, V. A. Natural vibrations of orthotropic ribbed cylindrical shells. – Text : direct. – In: *Applied mechanics*. – 1991. – Volume 27, № 10. – P. 83–90. (in Russian)
 11. Mushchanov, V. F.; Tseplyayev, M. N. Ensuring the stability of the tank walls based on the rational arrangement of stiffening rings. – Text : direct. – In: *Construction of unique buildings and structures*. – 2018. – № 9(72). – P. 58–73. (in Russian)
 12. Zhgutov, V. M.; Petersburg State Transport University. Nonlinear free vibrations of shallow shells of step-variable thickness : Thesis of Ph. D. in engineering. – St. Petersburg, 2004. – 177 p. – Text : direct. (in Russian)
 13. Malyutin, I. S. Stability and vibrations of a cylindrical shell, discretely reinforced by a polyregular rib system. – Text : direct. – In: *Proceedings of the X All-Union Conference on the Theory of Plates and Shells*. In 2 volumes. – Tbilisi : Metsniereba. – 1975. – Volume 1. – P. 671–679. (in Russian)
 14. Telalov, A. I. Determination of the minimum natural frequency of vibrations of a spherical shell with a rigidly attached mass. – Text : direct. – In: *Applied mechanics*. – 1987. – Volume 23, № 7. – P. 103–105. (in Russian)
 15. Beskos, D. E.; Oates, J. B. Dynamic analysis of ring-stiffened circular cylindrical shells. – Text : direct. – In: *Journal of Sound and Vibration*. – 1981. – Volume 75, № 1. – P. 1–15. (in English)
 16. Gontkevich, V. S. Natural vibrations of orthotropic cylindrical shells. – Text : direct. – In: *Proceedings of the conference on the theory of plates and shells of Kazan State University*. – 1961. – Issue 1. – P. 124–129. (in Russian)
 17. Kukarina, A. I.; Matsner, V. I.; Sivak, V. F. Influence of initial deflections on natural vibrations of ribbed cylindrical shells. – Text : direct. – In: *Applied mechanics*. – 1982. – Volume 18, № 4. – P. 58–63. (in Russian)
 18. Zenkevich, O.; Morgan, K. ; translation from english B. I. Kvasov ; edited by N. S. Bakhvalov. Finite elements and approximation. – Moscow : World, 1986. – 318 p. – Text : direct. (in Russian)
 19. Myachenkov, V. I. Calculations of mechanical engineering structures by the finite element method. – Moscow : Mashinostroyeniye, 1989. – 520 p. – Text : direct. (in Russian)
 20. Sakharov, A. S.; Kislooky, V. N.; Kirichevsky, V. V. [et. al.]. Finite Element Method in Solid Mechanics. – Kiev: High School, 1982. – 480 p. – Text : direct. (in Russian)

- В. Ф. Сивак. – Текст : непосредственный // Прикладная механика. – 1982. – Том 18, № 4. – С. 58–63.
18. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган ; перевод с англ. Б. И. Квасова ; под ред. Н. С. Бахвалова. – Москва : Мир, 1986. – 318 с. – Текст : непосредственный.
19. Мяченков, В. И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / В. И. Мяченков. – Москва : Машиностроение, 1989. – 520 с. – Текст : непосредственный.
20. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров, В. Н. Кислокий, В. В. Киричевский [и др.]. – Киев : Вища школа, 1982. – 480 с. – Текст : непосредственный.
21. Свободные колебания круговой цилиндрической оболочки, защемленной по торцам. – Текст : электронный // ScadSoft : [сайт]. – 2020. – URL: https://scadsoft.com/tests_scad/index/test/77 (дата обращения: 01.09.2021).
22. Петровская, М. В. Расчет собственных частот колебаний РВС-3000 / М. В. Петровская, А. М. Ворожейкин. – Текст : электронный // Деловой журнал «Neftegaz.RU». – 2015. – № 11-12(47-48). – С. 78–81. – URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/oborudovanie/671361-raschet-sobstvennykh-chastot-kolebaniy-rvs-3000/> (дата обращения: 03.09.2021).
23. Типовой проект 704-1-70. Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 куб. м. – Москва : ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1984. – 44 с. – Текст : непосредственный.
24. Тест 4. Цилиндрическая оболочка. – Текст : электронный // Лира софт : [сайт]. – 2018. – URL: <http://www.lira.com.ua/press-centre/verif/detail.php?ID=1242> (дата обращения: 03.09.2021).
25. Мушчанов, В. Ф. Напряжения в кровле резервуара, состоящего в группе, при действии ветра / А. В. Зубенко, В. Ф. Мушчанов, М. Н. Цепляев. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 5 (68). – С. 36–51.
26. Mushchanov, V. P. The stress state of a tank shell in the group under wind load / V. P. Mushchanov, A. V. Zubenko, M. N. Tsepliaev. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – №. 7(83). – С. 49–62.
21. Free vibrations of a circular cylindrical shell, clamped at the ends. – Text : electronic. – In: *ScadSoft* : [site]. – 2020. – URL: https://scadsoft.com/tests_scad/index/test/77 (date of the application: 01.09.2021). (in Russian)
22. Petrovskaya, M. V.; Vorozheykin, A. M. Calculation of natural vibration frequencies RVS-3000. – Text : electronic. – In: *Business magazine «Neftegaz.RU»*. – 2015. – № 11-12(47-48). – P. 78–81. – URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/oborudovanie/671361-raschet-sobstvennykh-chastot-kolebaniy-rvs-3000/> (date of the application: 03.09.2021). (in Russian)
23. Typical project 704-1-70. Steel vertical cylindrical tank for oil and oil products with a capacity of 20 000 cubic meters. – Moscow : Central Research and Design Institute of Building Metal Structures State Committee for Construction of the USSR, 1984. – 44 p. – Text : direct. (in Russian)
24. Test 4. Cylindrical shell. - Text : electronic. - In: Lira soft : [site]. – 2018. – URL: <http://www.lira.com.ua/press-centre/verif/detail.php?ID=1242> (date of the application: 03.09.2021). (in Russian)
25. Mushchanov, V. F.; Zubenko, A. V.; Tseplyayev, M. N. Stresses in the roof of a tank in a group under the action of wind. – Text : direct. – In: *Construction of unique buildings and structures*. – 2018. – № 5 (68). – P. 36–51. (in Russian)
26. Mushchanov, V. P.; Zubenko, A. V.; Tseplyayev, M. N. The stress state of a tank shell in the group under wind load. – Text : direct. – In: *Engineering and construction journal*. – 2018. – №. 7(83). – P. 49–62. (in English)

Цепляев Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчёт и проектирование вертикальных цилиндрических резервуаров, повышение эффективности методик расчёта оболочек на устойчивость.

Цепляев Максим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування вертикальних циліндричних резервуарів, підвищення ефективності методик розрахунку оболонок на стійкість.

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