

Влияние жидкого груза на частотные характеристики оболочки котла вагона-цистерны



Павел ГРИГОРЬЕВ



Сергей КОРЖИН



Шерзод ИБОДУЛЛОВ

Павел Сергеевич Григорьев¹, Сергей Николаевич Коржин², Шерзод Рустамович Ибодуллоев³

^{1, 2} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

³ Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Ташкент, Узбекистан.

¹ ORCID 0000-0002-5841-341X; Scopus Author ID: 57966694500; РИНЦ SPIN-код: 2014-9531; РИНЦ Author ID: 841994.

² ORCID 0009-0003-4783-3413; Scopus Author ID: 57223093144; РИНЦ Author ID: 4350996.

³ ORCID 0000-0002-1436-3844; Scopus Author ID: 57982866900; РИНЦ SPIN-код: 8498-3972; РИНЦ Author ID: 947316.

✉ ¹ grigorev.p@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию влияния уровня заполнения жидким грузом на частотные характеристики оболочки котла вагона-цистерны.

В рамках работы применен подход, используемый для оценки частот и форм собственных колебаний стальных резервуаров под воздействием сейсмических нагрузок. Данный подход предполагает учет двух компонентов собственных частот: импульсивной и конвективной. Для определения перечисленных частот и форм собственных колебаний выбран метод конечных элементов с использованием акустических элементов FLUID221. Выбор

метода обоснован в ранее проведенных исследованиях авторов.

С использованием выбранного метода были исследованы конвективные собственные частоты колебаний свободной поверхности жидкости и импульсные частоты собственных колебаний с различным уровнем заполнения жидким грузом котла вагона-цистерны. Подтверждение достоверности результатов для импульсных частот оболочки, содержащей жидкость, обеспечивается согласованностью с данными, полученными авторами в предшествующих работах с использованием полубезмоментной теории оболочек.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагон-цистерна, котел вагона-цистерны, частоты колебаний, формы колебаний, свободная поверхность, конвективные частоты, импульсные частоты.

Для цитирования: Григорьев П. С., Коржин С. Н., Ибодуллоев Ш. Р. Влияние жидкого груза на частотные характеристики котла вагона-цистерны // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-6>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки конструкций для железнодорожного подвижного состава основное внимание уделяется проведению всесторонних исследований, цель которых – тщательная оценка динамических характеристик. Такие исследования являются критически важными по причине специфических условий эксплуатации, в которых функционируют вагонные конструкции. В частности, анализ собственных частот колебаний и их модальных форм для грузовых вагонов становится неотъемлемым элементом проектирования¹, обеспечивающим безопасную и надежную работу конструкции вагона. Понимание частотных характеристик конструкций позволяет инженерам предотвращать опасные резонансные явления, которые способны привести к аварийным ситуациям.

Основная цель исследования – оценка собственных частот и форм колебаний оболочки котла вагона-цистерны. Одной из ключевых проблем, усложняющих процесс расчета этих параметров, является необходимость учета характеристик перевозимого груза. В связи с этим основной задачей исследования становится учет взаимодействия груза с конструкцией котла вагона-цистерны, которое, как показывают практика и теоретические исследования, оказывает заметное влияние на частотные характеристики системы. В практике расчетов учет жидкости в резервуарах, подвергающихся различного рода динамическим нагрузкам, требует особого внимания при проектировании для обеспечения безопасности и надежности конструкции.

ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ

Задачам подобного рода уделяется большое внимание в области расчетов стальных резервуаров на сейсмические воздействия. Основы расчетов математической модели системы «резервуар – жидкость» заложил в 1954 году в своей работе Дж. Хаузнер [1]. В этом подходе рассматривалась упрощенная математическая модель, состоящая из системы дискретных масс, что позволяло существенно облегчить процесс вычисления сил гидродинамики. Предложенная модель вклю-

чала два вида кинематической свободы: импульсивную, которая относилась к движению оболочки резервуара вместе с основной массой его содержимого, и конвективную, связанную с движением волн на поверхности жидкости внутри. Основываясь на предположении, что стенки контейнера абсолютно недеформируемы, а жидкость идеально несжимаема и не имеет внутреннего трения, Хаузнер применил упрощенные вычислительные подходы для вывода формул, касающихся ряда различных типов контейнеров, включая цилиндрические. В настоящее время в ряде зарубежных стран для резервуаров с гибкими стенками используется модель Харуна и Хаузнера [2], а для резервуаров с жесткими стенками – модель Велетсоса и Янга [3]. В отечественной практике расчетов распространение получили рекомендации, предложенные И. И. Гольденблатом и Н. А. Николаенко [4].

Для рассматриваемой задачи представляет интерес выражение для определения частоты плескания свободной поверхности жидкости:

$$\omega_n = \frac{g}{R} \lambda_n \operatorname{th} \left(\lambda_n \frac{H}{R} \right), \quad (1)$$

где λ_n – нули модифицированной функции Бесселя (для определения первой формы волны плескания λ_n принимается равной 1,84);

n – форма колебаний;

g – ускорение свободного падения;

H – высота цилиндрического резервуара;

R – внутренний радиус резервуара.

Несмотря на достаточно обширные исследования в области оценки частот резервуаров с жидкостью, учитывающих как конвективные, так и импульсивные частоты, применительно к оболочкам котлов вагонов-цистерн такие расчеты не выполнялись. В работах [5; 6] рассматриваются аналитические подходы к оценке частотных характеристик оболочек котлов вагонов-цистерн с учетом уровня заполнения их жидким грузом. Результаты этих расчетов показали удовлетворительное согласование с результатами, полученными исследователями ранее [6], и результатами, полученными на основе экспериментальных исследований [7; 8].

В статье [9] авторами были рассмотрены подходы к оценке собственных частот котлов вагонов-цистерн и различные способы оценки влияния жидкости на собственные колебания с использованием численных методов. К таким

¹ ГОСТ 33788-2016 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200137251>. Доступ 21.02.2024.

методам относятся анализ собственных частот с применением расширения Acoustic body, учет жидкости как распределенной массы, моделирование жидкости в виде твердого тела, использование элемента FLUID80 и применение акустических элементов.

Согласно результатам проведенного исследования, наиболее приемлемым оказался подход, заключающийся в учете жидкости внутри цистерны с использованием акустических элементов.

В статье [10] показан пример расчета частотных характеристик, включая собственные частоты и формы колебаний квадратного резервуара методом конечных элементов с использованием акустических элементов FLUID221. Этот подход позволил оценить импульсивные и конвективные частоты резервуара при разных уровнях наполнения и различных условиях. Достоверность рассмотренного подхода подробно описана в работах [11; 12] путем сравнения различных аналитических и численных методов оценки частот собственных колебаний системы «механическая система – жидкость» или так называемого взаимодействия жидкости и конструкции (Fluid Structure Interaction, FSI).

В работе [11] рассматривалось несколько вариантов численного моделирования учета жидкости как акустического тела, в том числе как элемента жидкости FLUID80 и как различных типов акустического элемента жидкости FLUID30/220/221.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ FLUID80

Элемент FLUID80 представляет собой отдельный элемент жидкости, который использует такие свойства материала, как плотность (DENS) и модуль объемного сжатия (EX). Для моделирования взаимодействия жидкости и твердого тела на интерфейсе FSI используются отдельные, но совпадающие узлы. Эти узлы соединены с твердым телом таким образом, что они могут скользить в тангенциальном направлении относительно тела, но связаны в нормальном направлении. Достичь этого можно путем создания соответствующих сеток на границе раздела жидкости с твердым телом и на интерфейсе твердого тела с жидкостью. Затем совпадающие узлы соединяются в нормальном направлении. Эти элементы обладают степенями свободы UX, UY и UZ. В исследованиях [13; 14] данный

элемент применен при моделировании резервуаров для хранения жидкости. Отметим, что блочный решатель Ланцоша [15; 16] также подходит для этих элементов. Элемент может генерировать несколько низкочастотных плескающихся форм колебаний жидкости, которые могут возникать при незначительном движении твердых тел или даже при отсутствии движения. Поэтому рекомендуется пропускать или игнорировать низкочастотные моды жидкости при оценке импульсных частот собственных колебаний. Эти моды также могут быть идентифицированы по их малому коэффициенту массового участия.

FLUID30, FLUID220 и FLUID221

FLUID30 представляет собой элемент акустической жидкости, который имеет общие узлы с соседними твердотельными элементами. Этот элемент использует плотность жидкости (DENS) и скорость звука (SONC) для определения свойств материала. Ранее элемент FLUID30 использовал несимметричную матрицу, из-за чего требовался несимметричный решатель. Соответственно, модальный анализ не мог сопровождаться анализом вынужденного отклика и спектральной плотности мощности. Для моделирования взаимодействия жидкости и твердого тела (FSI) использовались два типа элементов FLUID30: жидкость, прилегающая к твердому телу, и жидкость, не соприкасающаяся с твердым телом. Жидкость, прилегающая к твердому телу, имеет степени свободы UX, UY, UZ и давление (PRES) для описания взаимодействия между твердым телом и жидкостью. Жидкость, которая не взаимодействует с твердым телом, имеет только степень свободы PRES для взаимодействия с другими элементами жидкости. Позже стали использоваться элементы FLUID30, позволяющие создавать симметричную матрицу. В отличие от элементов FLUID80, элементы FLUID30 менее чувствительны к плотности сетки.

FLUID220 и FLUID221 – это более высокопорядковые варианты FLUID30.

На основе проведенного анализа практических расчетов будем применять элемент FLUID221, который является трехмерным твердотельным 20-узловым элементом высшего порядка (см. рис. 1). Элемент FLUID221 используется для моделирования жидкой среды и границы раздела в задачах взаимодействия жидкости с конструкцией.



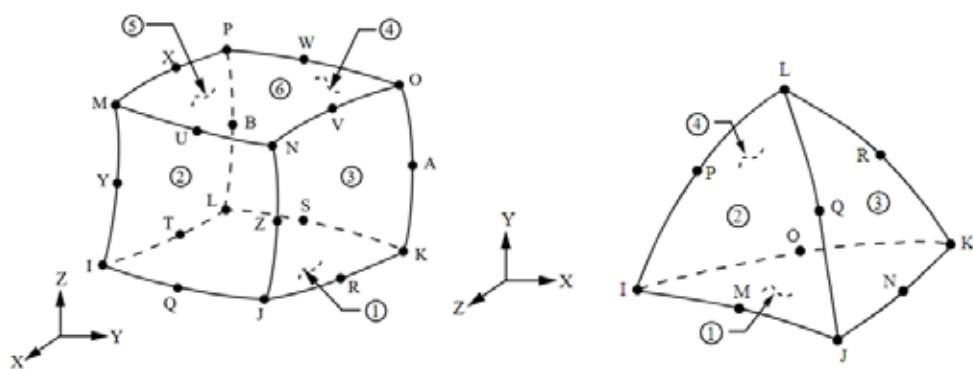


Рис. 1. Геометрия, расположение узлов и система координат элемента FLUID220 (слева) и FLUID221 (справа) [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID220.html; https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_FLUID221.html].

Исходные данные

Далее в расчетах будем использовать следующие исходные данные, представленные в таблице 1.

При дальнейших расчетах приняты следующие допущения:

- жидкость идеальная, несжимаемая;
- движение жидкости безвихревое;
- оболочка котла идеальной цилиндрической формы с эллиптическими днищами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 и 3 представлена исследуемая твердотельная модель.

Для наглядности на рис. 3 изображена модель, разрезанная в плоскости XOY, и показан уровень заполнения, соответствующий 90° (или коэффициенту заполнения, равному 0,5).

Разбиение модели на элементы выполнялось следующим образом: для твердого тела использовались элементы типа SOLID187, для жидкости – FLUID221, а контакт взаимо-

действия между твердым телом и жидкостью обеспечивался с помощью элементов CONTA174. Элемент CONTA174 необходим для создания контакта скольжения между элементами твердого тела и жидкости.

Первые формы колебаний импульсных и конвективных частот представлены на рис. 4 и 5 соответственно. В таблице 2 приведены результаты, полученные с использованием метода конечных элементов и на основе энергетического подхода [9], предложенного авторами с использованием полубезмоментной теории оболочек. При сравнении результатов расчетов было установлено, что они достаточно хорошо коррелируют между собой и находятся в одном диапазоне частот. Считаем эти результаты удовлетворительными.

Оценим влияние жидкости на частоты собственных колебаний самой оболочки, то есть на так называемые импульсные частоты. Из таблицы 2 ясно видно, что с увеличением уровня заполнения собственная частота коле-

Таблица 1

Исходные данные [выполнено авторами]

Обозначение	Название	Параметр	Размерность
E	Модуль упругости материала котла	210	ГПа
μ	Коэффициент Пуассона	0,3	–
g	Ускорение свободного падения	9,81	м/с ²
$\rho_{ст}$	Плотность материала оболочки	7850	кг/м ³
$\rho_{ж}$	Плотность материала жидкого груза	1000	кг/м ³
C	Скорость в акустической среде жидкого груза	1435	м/с ²
D	Диаметр цилиндрической части оболочки внутренний	3	м
h	Толщина оболочки котла	10	мм
$L_{ц}$	Длина цилиндрической части оболочки	17	м
$L_{эл}$	Длина вылета эллиптического днища	0,45	м
$\beta_{нал}$	Угол налива жидким грузом	0° – 180°	–

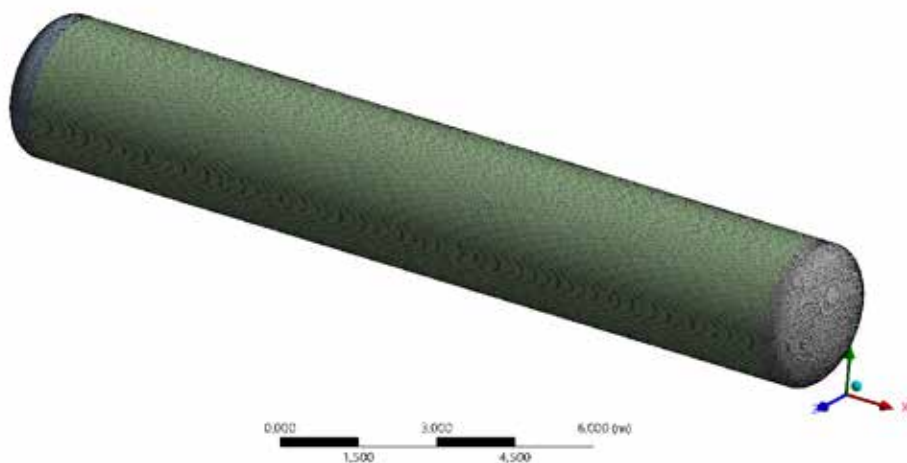


Рис. 2. Общий вид твердотельной модели [выполнено авторами].

F: Copy of Импульси, 17 м, 10 мм, 90 град
Solution
Frequency: N/A
15.01.2024 17:49

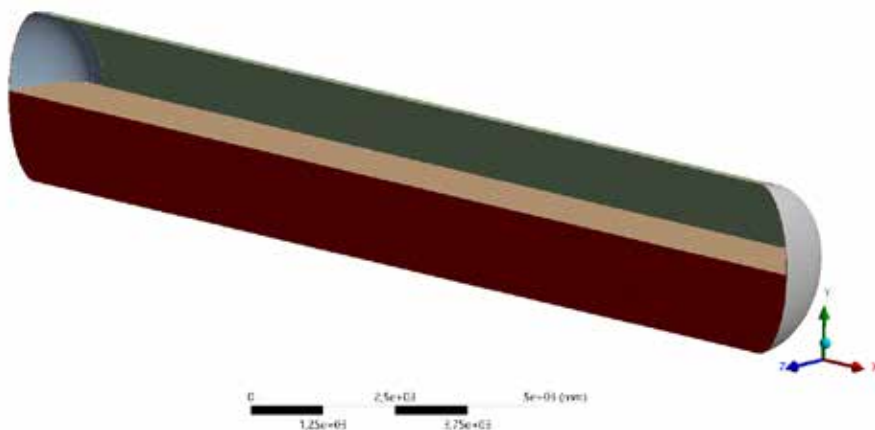


Рис. 3. Конечно-элементная модель оболочки котла [выполнено авторами].

E: Импульси, 17 м, 10 мм, 90 град
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 4,8051 Hz
Swirling Phase: 0, °
Unit: mm
22.02.2024 18:45

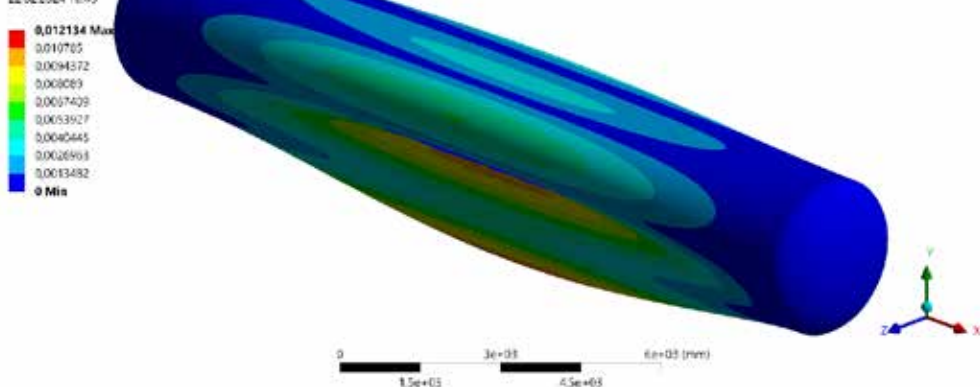


Рис. 4. Первая собственная форма импульсных колебаний оболочки котла вагона-цистерны, заполненной жидкостью [выполнено авторами].



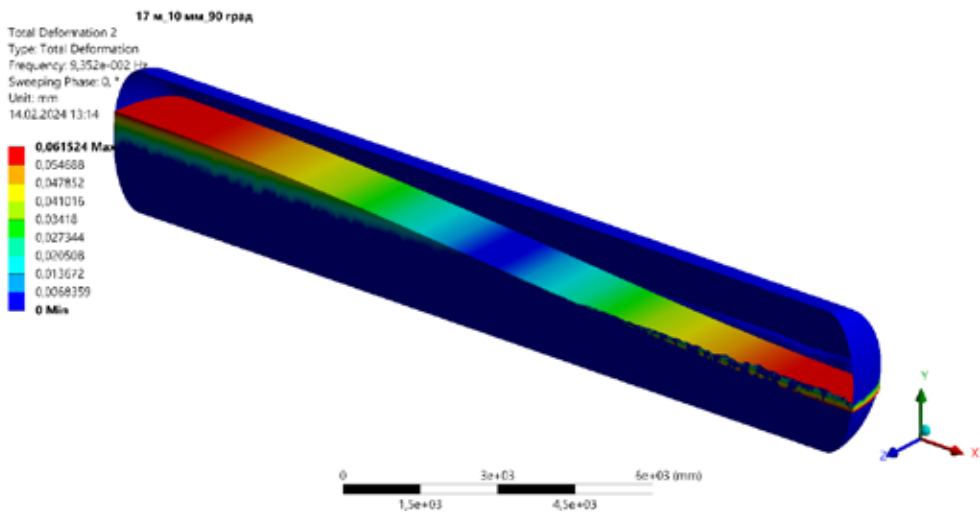


Рис. 5. Первая конвективная форма колебаний свободной поверхности жидкости [выполнено авторами].

баний снижается. Например, при изменении уровня заполнения с 0° до 171° собственная частота колебаний оболочки котла рассматриваемой модели уменьшается более чем на 50 %.

Отдельного внимания заслуживают конвективные частоты. Изучение плескания жидкости в котле вагона-цистерны является актуальной и достаточно сложной задачей. В таблице 2 напротив каждого уровня заполнения представлены две частоты импульсных колебаний свободной поверхности жидкости $f_{конв}$. Первая частота соответствует одной полуволне колебаний жидкости в продольном направлении; вторая – одной полуволне колебаний жидкости в поперечном направлении. По нашему мнению, эти виды колебаний жидкости легко возбуждаются при движении вагона-цистерны по неровностям пути. На-

пример, если котел вагона-цистерны заполнен на угол налива 153° и происходят вынужденные колебания с частотой галопирования 0,19 Гц, это может привести к движениям жидкости, оказывающим влияние на динамику вагона.

ВЫВОДЫ

Был проведен расчет частот и форм собственных колебаний оболочки котла вагона-цистерны с учетом различного уровня заполнения его жидким грузом. Расчет выполнялся с использованием метода конечных элементов, в котором применен элемент FLUID221. Такой подход позволил получить два вида собственных частот – импульсные и конвективные. Результаты расчетов показали удовлетворительную сходимость с подходами, предложенными авторами для решения по-

Таблица 2
Расчетные значения импульсных и конвективных частот [выполнено авторами]

Угол налива	Собственная частота оболочки с учетом жидкости (импульсная частота)		Собственная частота свободной поверхности жидкости (конвективная частота)	
	$f_{имп}, Гц$		$f_{конв}, Гц$	
	Энергетический подход	МКЭ	МКЭ	
171°	4,12	4,24	0,32	–
153°	4,17	4,35	0,19	0,83
126°	4,15	4,52	0,13	0,59
90°	5,45	4,86	0,093	0,47
54°	7,69	6,21	0,057	0,42
0°	10,81	10,89	–	

добных задач в их предыдущих работах, основанных на энергетических подходах и теории оболочек.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- применение метода конечных элементов и энергетического подхода на основе теории оболочек дает схожие результаты при оценке импульсных частот собственных колебаний;
- применяемый в исследовании подход позволяет оценить конвективные собственные частоты свободной поверхности жидкости, которые значительно ниже импульсных частот;
- заполнение котла вагона-цистерны жидким грузом существенно снижает собственную частоту его оболочки (для рассмотренного случая заполнение жидкостью приводит к уменьшению собственной частоты котла более чем на 57 %);
- конвективная частота свободной поверхности жидкости увеличивается с ростом уровня заполнения жидким грузом;
- в расчетах котлов вагонов-цистерн на прочность следует уделять внимание изменению собственной частоты его оболочки при заполнении их жидким грузом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Housner, G. W. Earthquake Pressures on Fluid Containers. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1954, 42 p.
2. Haroun, M. A., Housner, G. W. Seismic design of liquid storage tanks. Journal of the Technical Councils of ASCE, 1981, Vol. 107, Iss. 1, pp. 191–207. DOI: <https://doi.org/10.1061/JTCD9.0000080>.
3. Veletsos, A. S., Yang, J. Y. Earthquake response of liquid storage tanks. In: Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics, Second Annual Engineering Mechanics Division Specialty Conference, Raleigh, North Carolina, United States, May 23–25, 1977, 616 p., pp. 1–24.
4. Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Штоль А. Т., Тумасов В. Р. Рекомендации по расчету резервуаров и газгольдеров на сейсмические воздействия // Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1969. – 47 с.
5. Григорьев П. С., Суворова К. Е. Оценка частот собственных колебаний и динамических напряжений в оболочке котла цистерны // Изв. петербургского ун-та путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 637–643.
6. Чан Фу Тхуан, Григорьев П. С., Суворова К. Е. Расчетные зависимости и оценки частот и форм колебаний оболочки котлов цистерн // Мир транспорта. – 2018. – № 5 (78). – С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-5-7>.
7. Морзинова Т. Г. Колебания оболочек котлов цистерн с учетом их конструктивных особенностей / Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 1983. – 118 с.
8. Беспалько С. В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов / Дис. ... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2000. – 427 с.
9. Григорьев П. С., Чан Фу Тхуан, Ибодуллоев Ш. Р. Подходы к оценке собственных частот котлов вагонов-цистерн с учетом влияния жидкости // Рахматулинские чтения: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. / сост. А. Х. Закиров, Ш. Р. Ибодуллоев. – Ташкент: Нац. ун-т Узбекистана, 2023. – С. 51–52.
10. Anagha, B. V., Nimisha, P., Jayalekshmi, B. R. A study on effect of fluid on the modal characteristics of ground supported water tanks. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 936, Iss. 1, 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/936/1/012027>.
11. Rafatpanah, R. M., Yang, Jianfeng. Simulating fluid-structure interaction utilizing three-dimensional acoustic fluid elements for reactor equipment system model. Proceedings of the 23rd international conference on nuclear engineering, 2015, ICONE23–1732, pp. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2015.23._ICONE23-1_362.
12. Chiu, J., Brown, A. M. Characterization of the modal characteristics of structures operating in dense liquid turbopumps. In: ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina, USA. Vol. 7B: Structures and Dynamics, ISBN: 978-0-7918-5093-0, paper No. GT2017-63633, V07BT36A008. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2017-63633> [Ограниченный доступ].
13. Kangda, M. Z. An approach to finite element modeling of liquid storage tanks in ANSYS: A review. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, Vol. 6, Iss. 4, 226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00589-8>.
14. Jhung, Myung-Jo; Yu, Seon-Oh; Lim, Yeong-Taek. Dynamic characteristics of a partially fluid filled cylindrical shell. Nuclear Engineering and Technology, 2011, Vol. 43, Iss. 2, pp. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2011.43.2.167>.
15. Вахидов У. Ш., Согин А. В., Шапкин В. А., Шапкина Ю. В. Численные исследования колебаний узлов автомобилей // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 145–153. [Электронный ресурс]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2014/03/145–153.pdf>. Доступ 19.02.2024.
16. Zhang, X., Zhao, Y., Li, Sh. FEM modal analysis of vehicle frame based on ANSYS. 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), Xianning, China, 2011, pp. 2237–2240. DOI: <https://doi.org/10.1109/CECNET.2011.5768490> [Ограниченный доступ].

Информация об авторах:

Григорьев Павел Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропоездов и локомотивов Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта, Москва, Россия, grigorev.p@gmail.com.

Коржин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта, Москва, Россия, korjin@mit.ru.

Ибодуллоев Шерзод Рустамович – старший преподаватель кафедры механики и компьютерного моделирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Узбекистан, sherzod_uzmu@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 20.02.2024, одобрена после рецензирования 28.04.2024, принята к публикации 30.04.2024.

