

УДК 629.463.3:621.642.2:004.94

М.Г. ГЕГЕДЕШ, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика»¹

E-mail: maryna.g.kuzn@gmail.com

С.А. ПЕТРАЧКОВ

заведующий научно-исследовательской лабораторией «Грузовая, коммерческая работа и тарифы»¹

E-mail: ugkr@bsut.by

¹Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 10.10.2023.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОНТЕЙНЕРОВ-ЦИСТЕРН ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе представлены результаты прочностного анализа конструкции контейнера-цистерны для перевозки жидких грузов железнодорожным, автомобильным и водным транспортом на основе компьютерного моделирования. В качестве исходных условий для компьютерного эксперимента выбран наиболее жесткий с точки зрения нагрузок и экстремальный режим эксплуатации контейнеров-цистерн, подразумевающий удар в продольном направлении при столкновении железнодорожных вагонов во время их роспуска с горки на сортировочных станциях. Расчеты выполнялись с использованием модуля статического анализа Static Structural инженерного программного комплекса ANSYS Workbench для двух вариантов нагружения транспортного резервуара: нормативного, соответствующего ГОСТ 33211-2014, и уточненного варианта нагружения оболочки резервуара контейнера-цистерны. На основании численного решения системы дифференциальных уравнений движения жидкого груза, выполненного с помощью применяемого в модуле CFX инженерного программного комплекса ANSYS Workbench метода конечных объемов, получены значения гидродинамических давлений в резервуаре, которые были приняты в качестве исходных данных для уточненного расчета. Сделаны выводы о влиянии учета распределения гидродинамического давления внутри транспортного резервуара на напряженно-деформированное состояние контейнера-цистерны. Получено распределение нормальных, эквивалентных напряжений по Мизесу, а также деформации для двух расчетных схем. С помощью инструмента Fatigue Tool модуля статического анализа Static Structural определено число циклов, которое способна выдержать конструкция с учетом областей концентрации эквивалентных напряжений. Сформулированы выводы о результатах сравнения двух вариантов расчета, а также предложены рекомендации по повышению безопасности перевозки и обеспечению сохранности грузов с использованием контейнеров-цистерн.

Ключевые слова: контейнер-цистерна, напряженно-деформированное состояние, прочность, усталостные повреждения, гидродинамическая нагруженность оболочки резервуара

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-25-30>

Введение. Контейнеры-цистерны повсеместно используются при организации интермодальных перевозок, не требующих особых усилий по перемещению грузов с одного вида транспорта на другой. Конструкция такого контейнера-цистерны может повредиться при сильных воздействиях, вызванных соударением вагонов, а также иных динамических процессах, обусловленных изменением профиля дороги, состояния пути, тяговых или тормозных сил, в том числе приводящих к возникновению волновых процессов в транспортируемой жидкости.

Исследователями стран СНГ и дальнего зарубежья неоднократно выполнялись работы по модели-

рованию перевозки железнодорожным транспортом жидких грузов [1–3]. Отличительной особенностью перевозки наливных грузов является возможность перемещения жидкости относительно резервуара, которое может привести к возникновению повышенных давлений на его корпус.

Значительное число исследований отечественных и зарубежных авторов [4–6] посвящено анализу динамики и прочности железнодорожных вагонов-цистерн.

В то же время достаточно большой объем перевозки жидких грузов осуществляется с использованием контейнеров-цистерн, требования к прочности которых отличаются ввиду того, что они могут пере-

возиться как железнодорожным, так и другими видами транспорта. В соответствии с [7] расчет прочности конструкции контейнера-цистерны должен учитывать 18 режимов нагружения, однако самым неблагоприятным является продольный удар при транспортировке железнодорожным транспортом.

В исследовании [8] авторами получены значения горизонтальных сил, действующих на днище цистерны с водой, перевозимой на платформе, для случая соударения вагонов и определено, что зависимость от времени сил, действующих на торцевую стенку резервуара со стороны жидкости, имеет колебательный характер, что, в свою очередь, существенно влияет на устойчивость и прочность цистерны, а также на напряжения, возникающие в средствах крепления. Авторы [9] в ходе проведения серии расчетов, отличающихся величиной дискретизации конечно-элементной сетки, выявили, что для получения достаточно точной величины возникающих напряжений в элементах конструкции контейнеров-цистерн важную роль играет правильность разбиения геометрической модели танка-контейнера конечными элементами. Использование крупной сетки приводит к заниженным значениям напряжений.

При разработке новых контейнеров-цистерн, предназначенных для транспортировки на железнодорожном открытом подвижном составе, их необходимо испытать на динамический удар в продольном направлении в соответствии с регламентом на руководство [10]. В ходе испытаний проверяется прочность конструкции на основе построения кривой спектра ударного отклика и сравнения ее с минимальной кривой [11, 12], которую также можно исследовать с помощью компьютерного моделирования.

Таким образом, *цель представленной работы* заключается в анализе напряженно-деформированного состояния контейнера-цистерны в режиме нагружения, соответствующем ударному воздействию на платформу в продольном направлении при действии нормативной нагрузки на основе компьютерного моделирования.

Расчетная модель. Рассмотрен случай ударного воздействия на контейнер-цистерну типа

C11N17 T11 [13]. В таком резервуаре возможна транспортировка пищевых, агрессивных и легковоспламеняющихся жидкостей, коррозионных и прочих опасных веществ.

Нормативная вертикальная нагрузка в соответствии с [7] рассчитывается по формуле

$$P_b = m_{бр}g, \quad (1)$$

где $m_{бр}$ — масса брутто контейнера-цистерны, кг; для резервуара типа C11N17 T11 $m_{бр} = 36000$ кг [13]; g — ускорение свободного падения, м/с; принимается равным 9,8 м/с:

$$P_b = 36000 \cdot 9,8 = 352,800 \text{ кН.}$$

Во время ударного воздействия в продольном направлении действуют перегрузки до $4g$ [7], сила инерции груза рассчитывается по формуле

$$N_{гр} = 4m_{гр}g = 4 \cdot 36000 \cdot 9,8 = 1411,200 \text{ кН.} \quad (2)$$

На днище резервуара контейнера-цистерны также действует сила инерции груза, при этом она уравнивается продольной силой, приложенной к фитингам, и определяется следующим образом:

$$N_{и} = N_{гр} \frac{m_{гр}}{m_{бр}}, \quad (3)$$

где $m_{гр}$ — масса наливного груза, кг; примем максимальную грузоподъемность контейнера-цистерны, равную 31 900 кг [13];

$$N_{и} = 1411,200 \cdot \frac{31\,900}{36\,000} = 1250,480 \text{ кН.}$$

При эксплуатации контейнера-цистерны в описанном режиме днище резервуара испытывает гидроудар, давление которого рассчитывается по формуле

$$P = \frac{N_{гр}}{\pi R^2}, \quad (4)$$

где R — радиус контейнера-цистерны, м; $R = 1,2$ м;

$$P = \frac{1411,200}{3,142 \cdot 1,2^2} = 311,903 \text{ кПа.}$$

Общий вид контейнера-цистерны типа C11N17 T11 и расчетная модель для нее приведены на рисунке 1.

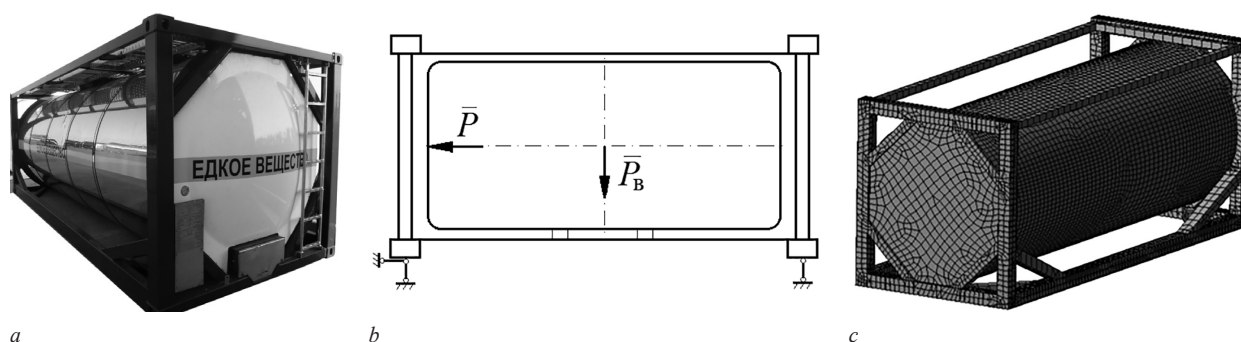


Рисунок 1 — Общий вид (а), расчетная схема (б) и конечно-элементная модель (с) контейнера-цистерны типа C11N17 T11
Figure 1 — General view (a), computational scheme (b) and finite element model (c) of tank-container of C11N17 T11 type

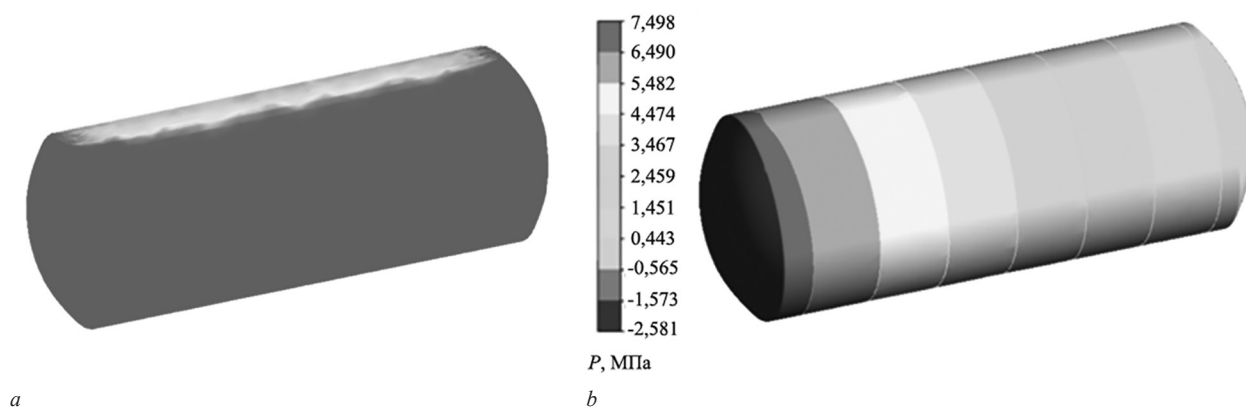


Рисунок 2 — Положение свободной поверхности жидкости при уровне налива 97 % (а) и распределение гидродинамических давлений в резервуаре контейнера-цистерны (b) сразу после ударного воздействия в продольном направлении
 Figure 2 — Liquid free surface position at 97 % fill level (a) and hydrodynamic pressure distribution in the tank-container (b) immediately after the impact in the longitudinal direction

Конечно-элементная модель конструкции (см. рисунок 1 с) включает более 80 000 элементов.

В соответствии с [10] при проведении испытаний ограничиваются перемещения контейнера во всех направлениях, минимизируются все зазоры. Резервуар может быть заполнен водой или любым другим веществом, не находящимся под давлением, примерно до 97 % объемной вместимости цистерны. Результаты испытания контейнера считаются удовлетворительными, если отсутствует остаточная деформация или повреждение, при которых контейнер-цистерна становится непригодной для использования. Т. е. после удара конструкция контейнера-цистерны должна соответствовать требованиям по габаритам, касающимся обработки, закрепления и перегрузки с одного перевозочного средства на другое при организации интермодальных перевозок.

Результаты компьютерного моделирования.

Расчет напряженно-деформированного состояния цистерны проводился в модуле Static Structural инженерного программного комплекса ANSYS Workbench для двух вариантов нагружения резервуара: нормативного и полученного на основании расчета гидродинамических давлений в цистерне с помощью модуля CFX.

Моделирование колебаний жидкого груза в резервуаре контейнера-цистерны осуществлялось при

выполнении условия несжимаемости жидкости [14], внутренний объем разделялся на две области, одна из которых заполнена транспортируемой жидкостью (водой), а другая — воздухом. Граница раздела двух фаз жидкостей в резервуаре определялась при помощи метода конечных объемов (VOF) [15]. Принималось, что в начальный момент жидкость находилась в состоянии относительного покоя и ее свободная поверхность была плоской. В качестве кинематического граничного условия использовалось условие прилипания. Шаг по времени при решении задач о перетекании жидких грузов составил 0,001 с; общее время моделирования — 2 с.

На рисунке 2 приведены положение свободной поверхности транспортируемого жидкого груза в резервуаре контейнера-цистерны и распределение гидродинамических давлений в резервуаре сразу после ударного воздействия.

Результаты расчета нормальных напряжений в конструкции контейнера-цистерны (рисунок 3) при единичном ударном воздействии показывают, что картина распределения напряжений схожа, однако при расчете в соответствии с уточненными параметрами нагружения оболочки резервуар испытывает в 1,72 раза большие, по сравнению с нормативным вариантом нагружения, сжимающие напряжения, что на практике может привести к появлению повреждений в зонах их концентрации.

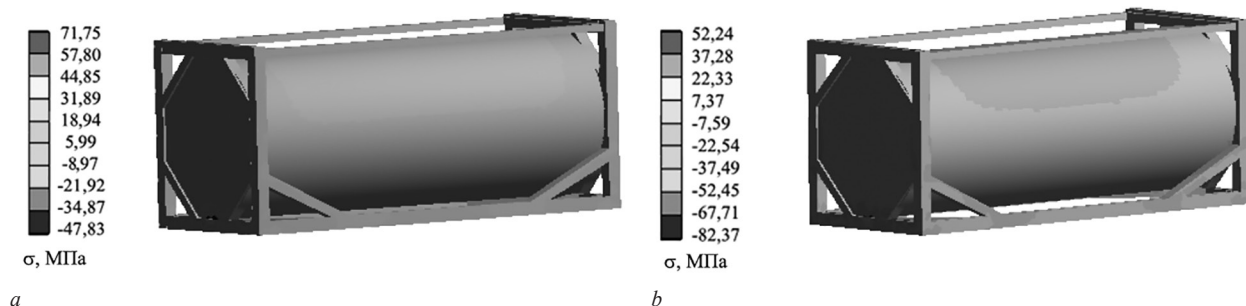


Рисунок 3 — Результаты расчета нормальных напряжений в продольном направлении:
 а — расчет в соответствии с ГОСТ 33211-2014; б — расчет в соответствии с уточненными параметрами нагружения оболочки резервуара
 Figure 3 — Calculation results of normal stresses in longitudinal direction:
 а — calculation according to GOST 33211-2014; б — calculation according to the refined loading parameters of a tank shell

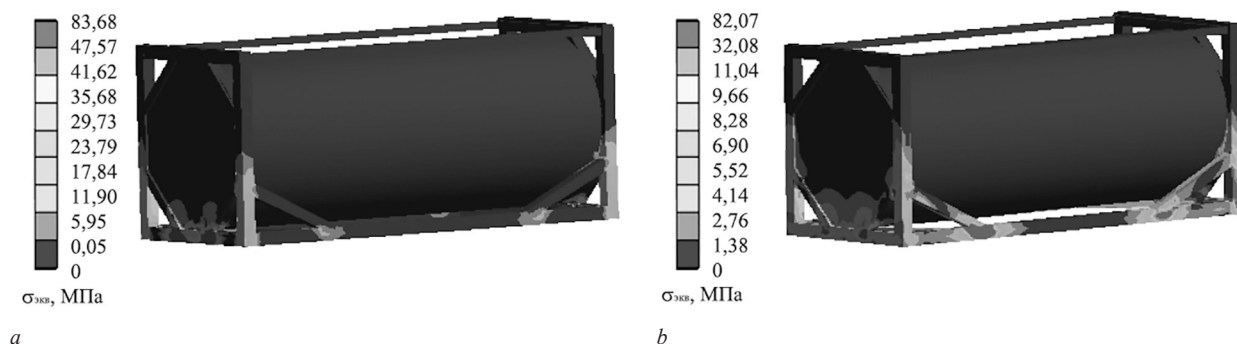


Рисунок 4 — Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу:

a — расчет в соответствии с ГОСТ 33211-2014; *b* — расчет в соответствии с уточненными параметрами нагружения оболочки резервуара

Figure 4 — Results of equivalent von Mises stress calculation:

a — calculation according to GOST 33211-2014; *b* — calculation according to the refined loading parameters of a tank shell

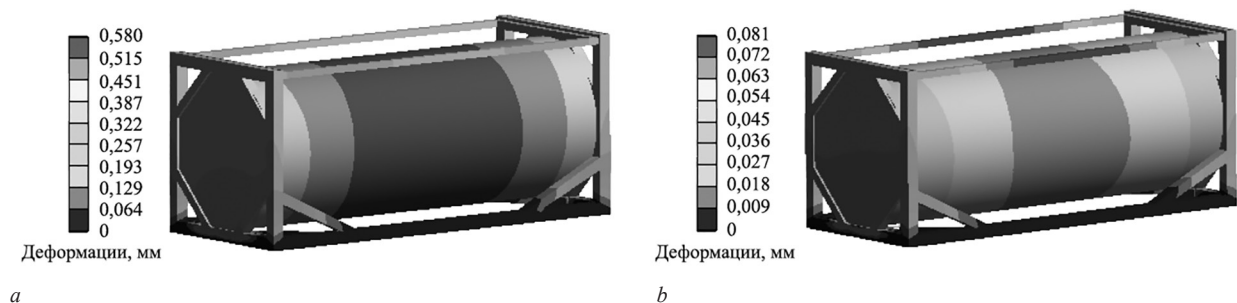


Рисунок 5 — Результаты расчета деформаций: *a* — расчет в соответствии с ГОСТ 33211-2014;

b — расчет в соответствии с уточненными параметрами нагружения оболочки резервуара

Figure 5 — Results of deformation calculation: *a* — calculation according to GOST 33211-2014;

b — calculation according to the refined loading parameters of a tank shell

Разница в значениях максимальных эквивалентных напряжений для двух вариантов нагружения конструкции контейнера-цистерны не превышает 0,2 % (рисунок 4), однако расчет в соответствии с уточненными параметрами нагружения оболочки резервуара показывает, что области концентрации повышенных напряжений соответствуют местам повреждений таких конструкций на практике.

Результаты расчета деформаций (рисунок 5) показали, что значения, полученные для нагружения в соответствии с нормативом, в 7,16 раз выше, что объясняется заложенным запасом прочности. Анализ усталостных явлений (рисунок 6) по эквивалентным напряжениям для этого варианта нагружения показывает, что наиболее нагруженные области

способны выдержать до 1643 ударных воздействий, то есть при регулярной эксплуатации в ударных режимах значительно снижается срок безаварийного использования контейнера-цистерны.

Выводы. На основе уточненной расчетной схемы нагружения контейнера-цистерны, полученной при анализе колебаний жидкого груза внутри резервуара при единичном ударе в продольном направлении, можно получить результат, более близкий к практическому опыту эксплуатации контейнеров-цистерн.

В частности, это касается показателей деформаций и нормальных напряжений в продольном направлении, в котором как раз и производится удар, т. е. при расчете нормальных напряжений и деформаций рекомендуется использовать уточненный расчет, а при оценке только эквивалентных напряжений (по Мизесу) достаточно стандартного расчета.

Поскольку по нормативам уровень заполнения контейнеров-цистерн может варьироваться от 80 до 97 %, необходимо выполнять уточненный анализ с учетом нагрузки, обусловленной относительным перемещением жидкого груза, для более точного прогнозирования срока эксплуатации конструкции и локализации зон повышенной деформируемости для разработки мероприятий по усилению конструкции контейнера-цистерны в этих местах.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22M-073).

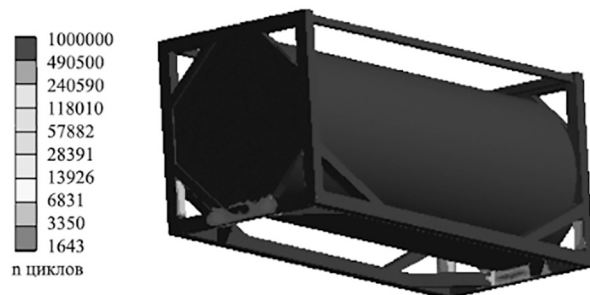


Рисунок 6 — Результаты расчета жизненного цикла конструкции при нормативном нагружении в соответствии с ГОСТ 33211-2014

Figure 6 — Calculation results of the structure life cycle under standard loading in accordance with GOST 33211-2014

Список литературы

1. Sloshing effects and running safety in railway freight vehicles / E. Di Gialleonardo [et al.] // *Vehicle System Dynamics*. — 2013. — Vol. 51, iss. 10. — Pp. 1640–1654. — DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.814797>.
2. Analysis of lateral sloshing forces within road containers with high fill levels / J.A. Romero [et al.] // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. — 2006. — Vol. 220, iss. 3. — Pp. 303–312. — DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO42>.
3. Sloshing dynamics in cylindrical tank with porous layer under harmonic and seismic excitations / M.-A. Xue [et al.] // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 235. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109373>.
4. Rahmati-Alaei, A. Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method / A. Rahmati-Alaei, M. Sharavi, M. Samadian Zakaria // *Multibody System Dynamics*. — 2020. — Vol. 50, iss. 1. — Pp. 45–69. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-019-09715-y>.
5. Котел железнодорожной цистерны: пат. RU 113702 U1 / А.В. Путьято, А.О. Шимановский. — Опубл. 27.02.2012.
6. Ashtiani, I.H. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver / I.H. Ashtiani, S. Rakheja, W. Ahmed // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. — 2019. — Vol. 233, iss. 10. — Pp. 1023–1037. — DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718823650>.
7. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: ГОСТ 33211-2014. — Введ. 01.07.2016. — М.: Стандартинформ, 2016. — 54 с.
8. Wang, Z. Study on Impact Process of a Large LNG Tank Container for Trains / Z. Wang, C. Qian, W. Li // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13, iss. 3. — DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031351>.
9. Макеев, С.В. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации / С.В. Макеев, П.М. Буйленков // *Наука — образование — производство: опыт и перспективы развития: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти д-ра техн. наук, проф. Е.Г. Зудова: в 2 т. / Мин-во образования и науки РФ, ФГАОУВО «Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагильский технологич. ин-т (филиал); отв. ред.: М.В. Миронова, А.А. Пыстогов. — Нижний Тагил: НТИ (фил.) УрФУ, 2018. — Т. 1. — С. 174–184.*
10. Рекомендации по перевозке опасных грузов: руководство по испытаниям и критериям. — Нью-Йорк–Женева: Организация объединенных наций, 2005. — 20 с.
11. Кузнецова, М.Г. Анализ спектра ударного отклика при испытаниях контейнеров на удар / М.Г. Кузнецова, А.О. Шимановский // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки*. — 2013. — Вып. 7. — С. 53–59.
12. Aspects of Strength Testing of Tank Containers in Compliance with the Requirements of the UN Navigation Rules and Regulations / A. Sulym [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9, iss. 3. — DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9030349>.
13. Морской танк-контейнер C11N17 T11 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.sespe.com/catalog/tank-konteyner/morskoy_tank_konteyner_c11n17_t11/. — Дата доступа: 20.03.2023.
14. Андрижиевский, А.А. Механика жидкости и газа: учеб. пособие / А.А. Андрижиевский. — Минск: Выш. школа, 2014. — 206 с.
15. Ferziger, J.H. Computational methods for fluid dynamics / J.H. Ferziger, M. Perić, R.L. Street. — 4th ed. — Cham: Springer, 2019. — 596 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>.

GEGEDESH Maryna G., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department “Technical Physics and Engineering Mechanics”¹

E-mail: maryna.g.kuzn@gmail.com

PETRACHKOU Syarhei A.

Head of the Research Laboratory “Freight, Commercial Work and Tariffs”¹

E-mail: ugkr@bsut.by

¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 10 October 2023.

COMPUTER-BASED STRENGTH ANALYSIS OF TANK-CONTAINERS UNDER IMPACT

The paper presents the strength analysis results for a tank-container designed for liquid cargo transportation by rail, automobile and water transport based on computer modeling. The most severe in terms of loads and extreme operation mode of tank-containers is chosen as the conditions for the computer experiment, implying an impact in the longitudinal direction when railway cars collide during their dismantling from the hill at marshalling stations. Calculations are performed using the static analysis module Static Structural of the ANSYS Workbench engineering software package for two loading options for a transport tank: a standard one, corresponding to GOST 33211-2014, and a refined loading option for the tank-container shell. Based on the numerical solution of the differential equations system for the liquid cargo movement, the analysis of which is performed using the finite volume method in the CFX module of the ANSYS Workbench engineering software package, the obtained values of hydrodynamic pressures in the tank are accepted as the initial data for the refined computer simulation. Conclusions are drawn on the influence of taking into account the distribution of hydrodynamic pressure inside the transport tank on the stress-

strain state of the tank-container. The distributions of normal, equivalent von Mises stresses, as well as deformations for two loading schemes are obtained. Using the Fatigue Tool of the Static Structural static analysis module, the number of cycles that the structure can withstand is determined, taking into account the equivalent stresses concentration areas. The conclusions are formulated based on the computational results, and the recommendations are offered to improve transportation safety and ensure the safety of cargo using tank-containers.

Keywords: tank-container, stress-strain state, strength, fatigue damage, hydrodynamic loading of the tank shell

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-25-30>

References

- Di Gialleonardo E., Premoli A., Gallazzi S., Bruni S. Sloshing effects and running safety in railway freight vehicles. *Vehicle system dynamics*, 2013, vol. 51, iss. 10, pp. 1640–1654. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.814797>.
- Romero J.A., Ramírez O., Fortanell J.M., Martínez M., Lozano A. Analysis of lateral sloshing forces within road containers with high fill levels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 2006, vol. 220, iss. 3, pp. 303–312. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO42>.
- Xue M.-A., Jiang Z., Lin P., Zheng J., Yuan X., Qian L. Sloshing dynamics in cylindrical tank with porous layer under harmonic and seismic excitations. *Ocean engineering*, 2021, vol. 235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109373>.
- Rahmati-Alaei A., Sharavi M., Samadian Zakaria M. Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method. *Multibody system dynamics*, 2020, vol. 50, iss. 1, pp. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-019-09715-y>.
- Putsiata A.V., Shimanovsky A.O. *Kotel zeleznodorozhnoy tsisterny* [Railway tank shell]. Patent RU, no. 113702 U1, 2012 (in Russ.).
- Ashtiani I.H., Rakheja S., Ahmed W. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit*, 2019, vol. 233, iss. 10, pp. 1023–1037. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718823650>.
- State Standard 33211-2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 54 p. (in Russ.).
- Wang Z., Qian C., Li W. Study on impact process of a large LNG tank container for trains. *Applied sciences*, 2023, vol. 13, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031351>.
- Makeev S.V., Buylenkov P.M. Osobennosti rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tanka-konteynera s uchedom realnogo nagruzheniya v ekspluatatsii [Features of calculating the stress-strain state of a tank container taking into account actual loading in operation]. *NAUKA–OBRAZOVANIE–PROIZVODSTVO: Opyt i perspektivy razvitiya. Tom 1. Gorno-metallurgicheskoe proizvodstvo. Mashinostroenie i metalloobrabotka*, 2018, pp. 174–184 (in Russ.).
- Rekomendatsii po perevozke opasnykh gruzov. Rukovodstvo po ispytaniyam i kriteriyam* [Recommendations for the transportation of dangerous goods. Manual of tests and criteria]. New York, Geneva, United Nations Organization, 2005. 20 p. (in Russ.).
- Kuzniatsova M.G., Shimanovsky A.O. Analiz spektra udarnogo otklika pri ispytaniyakh konteynerov na udar [The analysis of containers shock response spectrum at impact tests]. *Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki*, 2013, iss. 7, pp. 53–59 (in Russ.).
- Sulym A., Khozia P., Tretiak E., Pištěk V., Fomin O., Kučera P. Aspects of strength testing of tank containers in compliance with the requirements of the UN navigation rules and regulations. *Journal of marine science and engineering*, 2021, vol. 9, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9030349>.
- Morskoy tank-konteyner C11N17 T11* [Sea tank-container C11N17 T11]. Available at: https://www.sespel.com/catalog/tank-konteynery/morskoy_tank_konteyner_c11n17_t11/ (accessed 20 March 2023) (in Russ.).
- Andrzhievskiy A.A. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 2014. 206 p. (in Russ.).
- Ferziger J.H., Perić M., Street R.L. *Computational methods for fluid dynamics*. Cham, Springer, 2019. 596 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>.