

УДК 629.463.32

Оценка прочности котла вагона-цистерны при смещении наливного груза

Л. В. Мартыненко¹, А. П. Карбушева¹, Д. П. Кононов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Карбушева А. П., Кононов Д. П. Оценка прочности котла вагона-цистерны при смещении наливного груза // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 657–666. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-657-666

Аннотация

Цель: Оценка прочности котла вагона-цистерны при перевозке наливного груза. **Методы:** Определено напряженно-деформированное состояние котла вагона-цистерны при перевозке наливных грузов с помощью программного комплекса Femap, который позволяет моделировать поведение виртуальных деталей, узлов и агрегатов систем под воздействием нагрузок и определять их реакцию на заданное воздействие. **Результаты:** Предложена новая методика расчета котла вагона-цистерны с использованием коэффициента интенсивности напряжения, который напрямую зависит от трех составляющих распределения напряженно-деформированного состояния и снижения давления в зоне консольного крепления котла цистерны (опора на лежни) с максимальным давлением. Определен тензор напряжений в месте крепления котла, который зависит не только от особенностей крепления, но и от смещения наливного груза в процессе движения, что может привести к нарушению устойчивости вагона-цистерны. **Практическая значимость:** Расчеты по предложенной методике позволят моделировать реальное поведение котла вагона-цистерны при перевозке наливного груза и показать наглядно картину по распределению и концентрации напряжений в любом узле или детали, что является одной из основных задач при проектировании вагонов.

Ключевые слова: Вагон-цистерна, прочность, напряженно-деформированное состояние, тензор напряжений.

Введение

Цистерна вагона — это специализированный тип железнодорожного вагона, предназначенный для перевозки жидких и газообразных грузов. Она предназначена для транспортировки широкого спектра веществ, включая нефть, нефтепродукты, химикаты, сжиженные газы, пищевые продукты и другие жидкости [1]. Существует множество видов цистерн, предназначенных для перевозки различных грузов. Цистерны могут иметь различный объем, обычно от 50 до

120 м³ [2]. В статье рассмотрен вагон-цистерна модели 15-2169-02. Он подкатывается под двухосную тележку модели 18-9800 и эксплуатируется на магистральных железных дорогах колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 245 кН (25 тс).

В процессе движения наливной груз перемещается внутри котла при разгоне и торможении подвижного состава. В результате происходит смещение центра тяжести, что приводит к ухудшению управляемости и возникновению дополнительных напряжений в котле [3–7]. В настоя-

щее время существует возможность расчета котла вагона-цистерны в различных программных комплексах. Результаты расчета могут показать наглядно картину по распределению и концентрации напряжений в любом узле или детали, что является одной из основных задач при обеспечении безопасности движения. В данной работе использовался программный комплекс Femap, позволяющий моделировать поведение виртуальных деталей, узлов и агрегатов систем под воздействием нагрузок и определять их реакцию на заданное воздействие [8, 9].

1. Моделирование конечно-элементной модели котла цистерны

Перед тем как проводить расчеты, необходимо создать конечно-элементную модель котла вагона. Для этого во вкладке Geometry → point... программы Femap задаются координаты точек, необходимые для построения модели. Достаточно использовать координаты 9 точек (таблица).

Для получения геометрического контура данные точки соединяются между собой по следующему алгоритму: Geometry → Curve-Spline → Project Points... → Methods → Point. Отмечаются последовательно точки, относящиеся к днищу. Геометрический контур обечайки получается соединением двух точек модели Geometry → Curve-Line → Project Points... → Methods → Point

Координаты для построения модели котла цистерны

Номер узла	Координаты	
	x	y
1	6,6	0
2	6,57444	0,38823
3	6,49952	0,750
4	6,38033	1,06066
5	6,225	1,29904
6	6,04411	1,44889
7	5,850	1,500
8	5,750	1,500
9	0	1,500

прямой линией. Далее производится предварительная разметка геометрической модели: Mesh → Mesh Control → Size Along Curve..., отмечается кривая днища котла → Ok. Задается количество разбиений по длине, равное 16. В результате получается необходимая разметка днища котла для построения сетки элементов. Аналогично размечается цилиндрическая часть котла. Количество элементов на длину принимаем равной 20.

Для дальнейшей работы необходимо получить отражение имеющейся геометрической модели. Для этого в меню зеркального отражения отмечаются все имеющиеся геометрические элементы: Geometry → Reflect → Curve. Получается необходимая геометрическая модель котла цистерны (рис. 1).

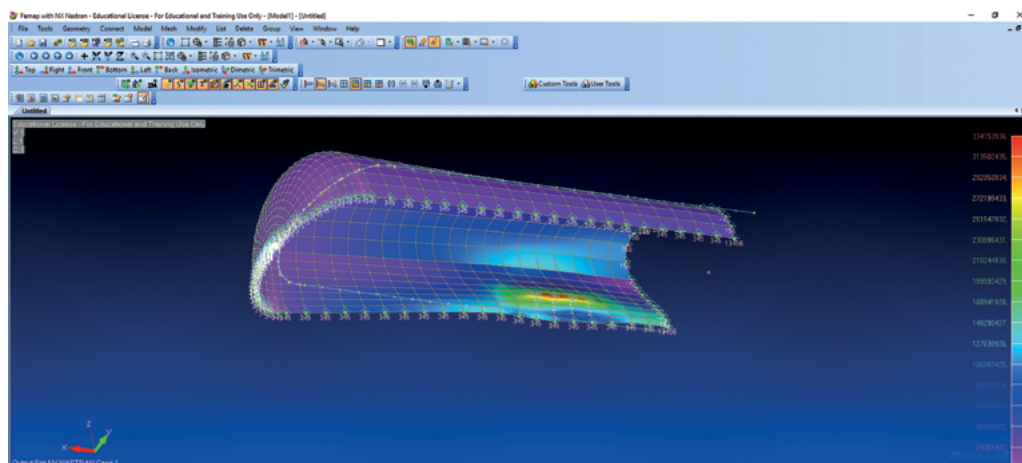


Рис. 1. Геометрическая модель котла цистерны

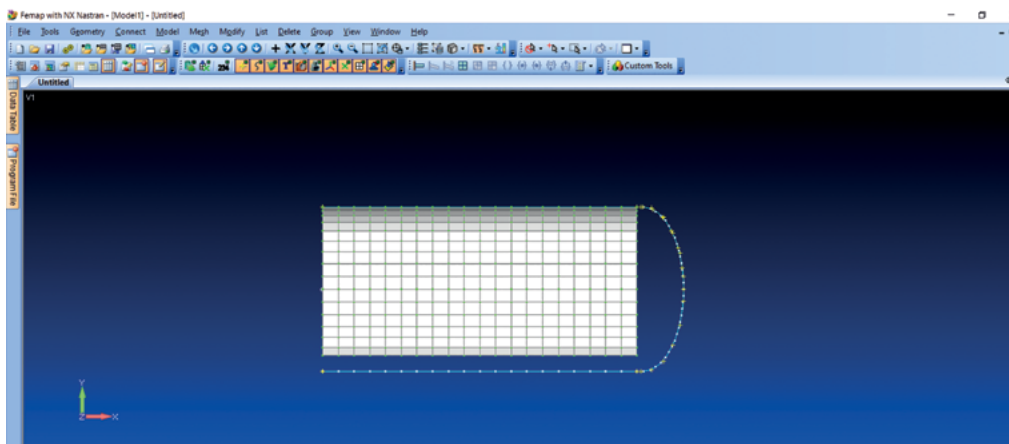


Рис. 2. Боковой и верхний лист цилиндрической части котла

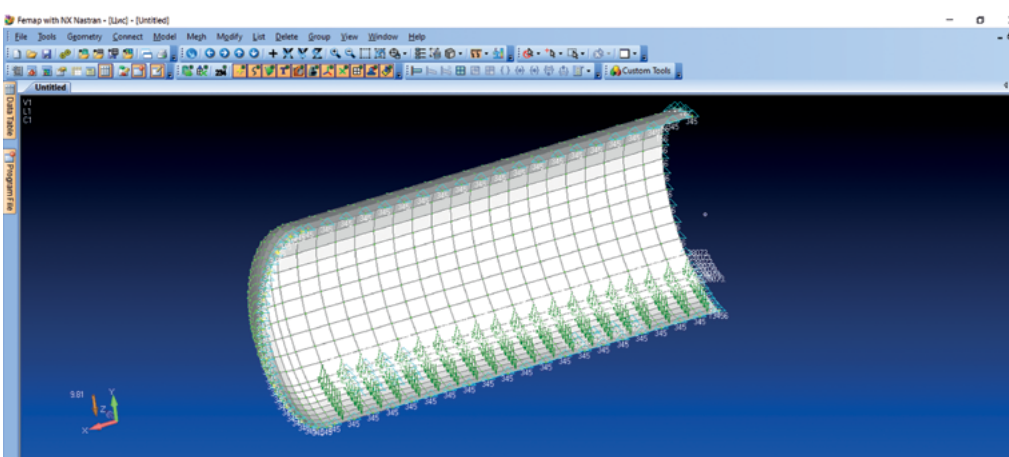


Рис. 3. Нагружение нижней части котла

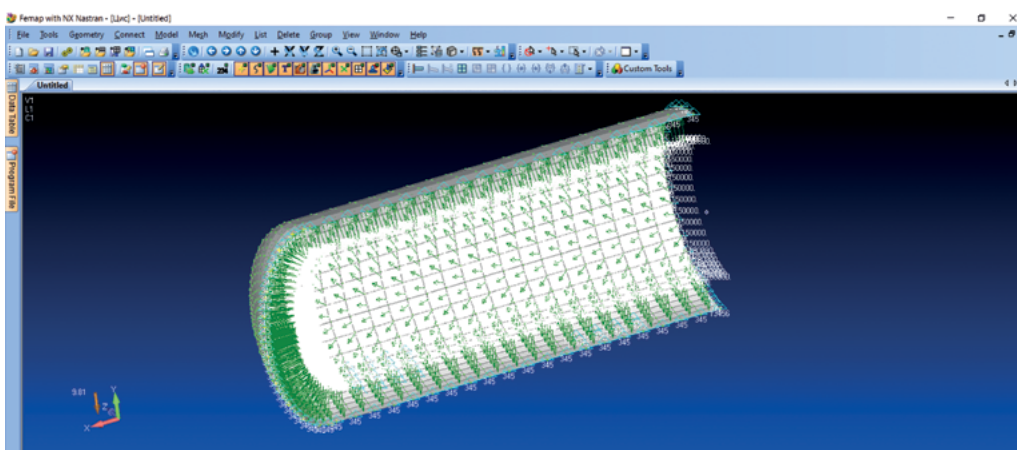


Рис. 4. Объемная нагрузка на модель котла цистерны

Далее, используя геометрическую модель котла, необходимо построить конечно-элементную модель. Начинаем с цилиндрической части. В меню «Вращение» нужно создать новое свой-

ство элемента (пластинчатый), присвоить ему соответствующее название и задать толщину. Так как цилиндрическая часть состоит из набора листов разной толщины (боковой и верхний —

9 мм, нижний — 11 мм), то создавать их нужно по отдельности. В меню «Вращение» Mesh → Revolve → Curve... нужно отметить верхнюю прямую геометрической модели. В результате получим боковой и верхний лист цилиндрической части котла (рис. 2).

Аналогичным образом строится нижний лист цилиндрической части котла.

Далее необходимо создать днище котла. Так как сетка днища котла должна быть связана с сеткой цилиндрической части, то днище нужно моделировать по частям. Отмечаем верхнюю кривую днища котла: Mesh → Revolve → Curve..., отмечаем верхнюю кривую днища котла геометрической модели.

2. Моделирование расчетных нагрузок

Следующим этапом является приложение расчетных нагрузок, действующих на котел вагона-цистерны [10–12]. По первому расчетному режиму на котел действуют: собственный вес конструкции (статический); статическая нагрузка от веса груза; рабочее давление (0,15 МПа). По третьему расчетному режиму на котел действуют: собственный вес конструкции (статический + динамический); нагрузка от веса груза (статистическая + динамическая); рабочее давление (0,15 МПа) [13–15]. Для приложения нагрузок необходимо создать сеанс нагружения и присвоить ему название: Model → Load → Create/Manage Set... → New Load Set → Ok (название) → Done.

Затем задается собственный вес ускорения свободного падения: Model → Load → Body... → Active → задать в A_y (–9,81) → Ok. В результате получим нагружение нижнего листа (рис. 3).

Для моделирования рабочего давления, вызванного расширением груза и регулировкой предохранительно-выпускного клапана, отмечаются все элементы модели и задается значение рабочего давления: Model → Load → Element... → Select All → Ok → Pressure (задаем 150 000) → Ok (рис. 4).

3. Расчет напряженно-деформированного состояния котла цистерны

Напряженно-деформированное состояние в месте крепления котла цистерны к раме вагона описывается следующими формулами:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right); \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}); \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}; \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (4)$$

где σ_{xx} — нормальные напряжения по оси абсцисс;

K_I — коэффициент интенсивности напряжений;

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (5)$$

r — радиус окружности котла цистерны, м;

θ — угловая координата;

σ_{yy} — нормальные напряжения по оси ординат;

μ — коэффициент Пуассона;

τ_{xy} — касательные напряжения по координате $xу$;

τ_{xz} — касательное напряжение по координате $xу$;

τ_{yz} — касательное напряжение по координате $уz$;

a — толщина стенки цистерны;

σ — нормальные напряжения в соответствующем направлении.

При $\theta = 0$ (на оси абсцисс), как следует из приведенных соотношений, значения компонент напряжений определяются равенствами:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}}; \quad \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (6)$$

и, следовательно, при $r \rightarrow 0$ (при приближении точки наблюдения к вершине трещины) значения

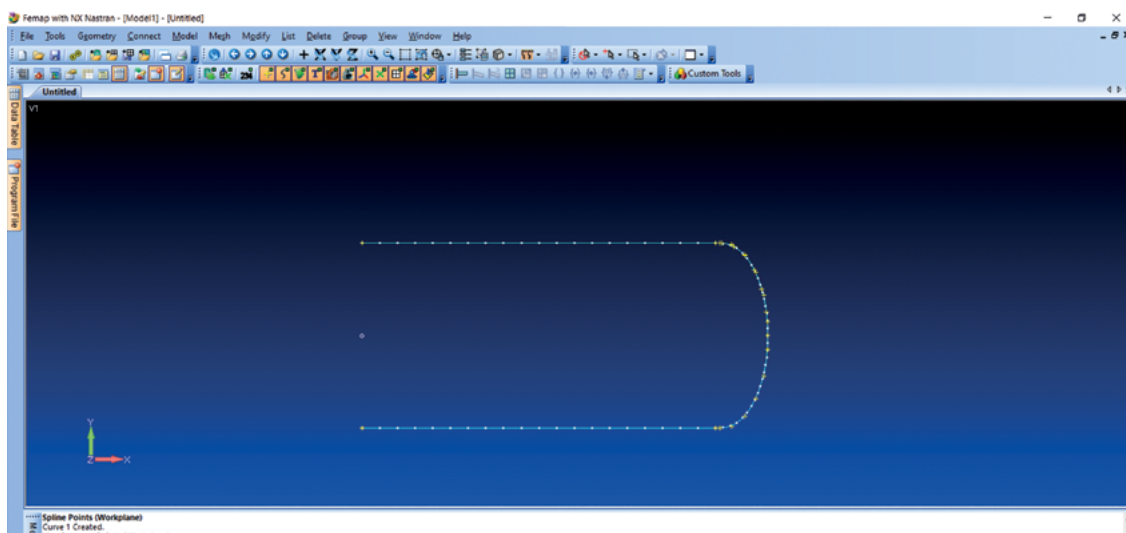


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние котла цистерны по первому расчетному режиму

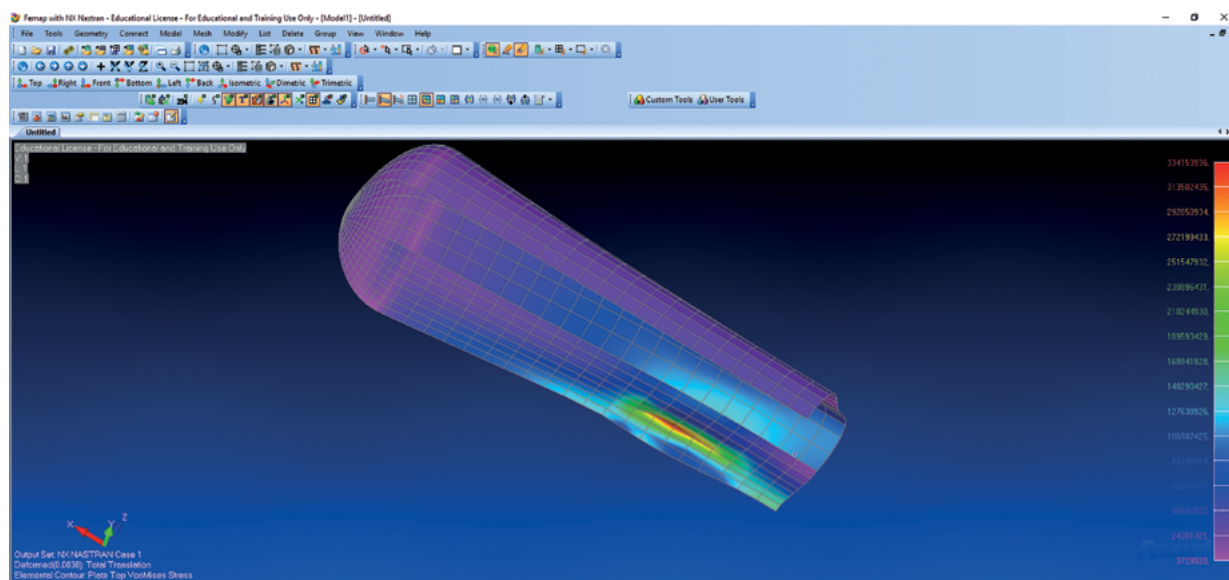


Рис. 6. Третий расчетный режим

нормальных напряжений и напряжения τ_{xy} стремятся к бесконечности, что и объясняет особую опасность появления трещин в элементах конструкций и сооружений. В реальности напряжения в деформируемых деталях и элементах конструкций ограничены и определяются упругопластическими свойствами материала. Можно показать, что для тела произвольной формы формулы (1)–(4) описывают главную часть возникающих в рассматриваемом теле компонент напряжений, отличаясь от них величинами, значения

которых при $r \rightarrow 0$ ограничены по величине. Значения коэффициента K_f определяются в этом случае не формулой (5), а зависят от размеров и формы рассматриваемых деталей и элементов сооружений, а также от уровня внешней нагрузки на них вдали от трещины.

Коэффициент K_f в механике хрупкого разрушения (разрушения деталей, вызванного наличием в них трещин и протекающего, как правило, без развития значительных по размеру зон пластического деформирования) играет особую роль

и называется коэффициентом интенсивности напряжений (КИН). Экспериментальное разрушение таких деталей и элементов показало, что в широком классе задач механики разрушения с приемлемой инженерной точностью предельное (т.е. соответствующее моменту разрушения) значение величины K_I является константой материала и определяет его трещиностойкость. Такое предельное значение обозначается K_{Ic} и существенно зависит от химического состава того или иного сорта стали или сплава металлов, а также от способа их термообработки.

В данной работе при проведении численного анализа НДС и определения коэффициента интенсивности напряжений в котле цистерны рассматриваются два различных случая: первый и третий расчетный режимы.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния котла цистерны по первому расчетному режиму приведены на рис. 5, по третьему расчетному режиму — на рис. 6.

Сопоставление расчетного и теоретического значения величины коэффициента интенсивности напряжений позволяет оценить погрешность осуществленного вычислительного эксперимента. Приведем необходимые для дальнейшего анализа соотношения. Для центральной точки поверхности контакта (в точке $x = 0$), используя соотношение (1), можем записать равенство

$$q_0 = \frac{P}{\pi a}, \quad (7)$$

из которого следует выражение величины P через контактное давление q_0 :

$$P = \pi a q_0, \quad (8)$$

где q_0 — контактное давление, Па;

P — нагрузка, кН.

Подставляя это выражение в равенство (7), получим соотношение

$$q = q_0 \frac{a}{\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad (9)$$

где x — координата центральной точки поверхности контакта.

В точке $x = x_*$ после проведения конечно-элементного расчета величины $q_0^{\text{МКЭ}}$ равенство (4) приближенно может быть записано в виде:

$$q_* = q_0^{\text{МКЭ}} \frac{a}{\sqrt{a^2 - x_*^2}}. \quad (10)$$

Существенно, что величина $q_0^{\text{МКЭ}}$, характеризующая контактное давление вдали от точки сингулярности, может быть определена с высокой степенью точности с помощью конечно-элементного моделирования. Формула (10) с высокой степенью точности дает при этом теоретическое значение величины q_* . Приближенное значение этой величины, обозначаемое далее $q_*^{\text{МКЭ}}$, может быть определено с помощью программного комплекса Femap. Погрешность расчета этой величины ε_1 может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{|q_* - q_*^{\text{МКЭ}}|}{q_*}. \quad (11)$$

Заключение

Программное обеспечение комплекса Femap является важным инструментом для определения напряженно-деформированного состояния котла цистерны, который показал, что определение тензора напряжений зависит не только от особенностей крепления котла цистерны, но и от смещения котла цистерны, которое может повлечь за собой нарушение устойчивости вагона-цистерны.

Список источников

1. Гридюшко В. И. Вагонное хозяйство: учебник / В. И. Гридюшко, Н. З. Криворучко, З. П. Бугаев. — М.: Транспорт, 1988.

2. Вагонное хозяйство: учебник / Под ред. П. А. Устича. — М.: Маршрут, 2003.
3. Цыганская Л. В. О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов / Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн, Н. А. Атаманчук // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 4. — С. 24–39. — DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39.
4. Григорьев П. С. Оценка устойчивости цилиндрической оболочки котла цистерны с учетом заполнения ее жидким грузом / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин, Ш. Р. Ибодуллоев // Транспорт Урала. — 2021. — № 4(71). — С. 40–45. — DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45.
5. Сурнин А. Ю. Оценка влияния различных факторов на величину остаточных деформаций в котле вагона цистерны при действии статической нагрузки от веса жидкого груза / А. Ю. Сурнин, В. М. Меланин, С. В. Беспалько // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции, Ташкент, 17–20 апреля 2024 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. — С. 402–411.
6. Сурнин А. Ю. К вопросу о моделировании разрушения котла железнодорожной цистерны ударом дугами безопасности при опрокидывании / А. Ю. Сурнин, С. В. Беспалько // Транспорт Урала. — 2022. — № 4(75). — С. 21–27. — DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-21-27.
7. Громаков М. С. Моделирование поперечных колебаний жидкости в цистерне с применением модельного эксперимента / М. С. Громаков, С. В. Беспалько, Н. А. Корниенко, Л. В. Колокольчикова // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2021. — № 5. — С. 8–15. — DOI: 10.36535/0236-1914-2021-05-2.
8. Григорьев П. С. Оценка устойчивости котла цистерны на основе вариационного принципа Лагранжа / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин // Наука и техника транспорта. — 2022. — № 2. — С. 39–46.
9. Сурнин А. Ю. Моделирование остаточных деформаций котла вагона-цистерны на основе теории ползучести / А. Ю. Сурнин, С. В. Беспалько // Транспортное машиностроение. — 2023. — № 7(19). — С. 66–76. — DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76.
10. Ручкин В. Б. Определение динамической нагруженности котла железнодорожной цистерны с применением специализированных конечных элементов / В. Б. Ручкин, Н. А. Корниенко, С. В. Беспалько // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. — М.: Российский университет транспорта, 2023. — С. 637–643. — DOI: 10.30932/9785002182794-2023-637-643.
11. Григорьев П. С. Вариант представления разрешающего уравнения полубезмоментной теории круговых цилиндрических оболочек в форме Доннелла для расчетов напряженного состояния и устойчивости котлов вагонов-цистерн / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, Н. С. Кодиров // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Второй Международной научно-технической конференции, Ташкент, 19–22 апреля 2023 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2023. — С. 114–119.
12. Цыганская Л. В. Выбор схем нагружения для испытаний длиннобазного подвижного состава / Л. В. Цыганская, А. Н. Смирнов, Н. А. Атаманчук и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. — С. 222–223.
13. Оценка сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных колебаниях кузова / М. С. Громаков, С. В. Беспалько, О. И. Мироненко, А. В. Зяблов // Наука и техника транспорта. — 2021. — № 3. — С. 10–13. — DOI: 10.53883/20749325_2021_03_10.
14. Григорьев П. С. Определение продольной силы, действующей на оболочку котла безрамной цистерны при

столкновении с жестким препятствием / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин, Ш. Р. Ибодуллоев // Наука и техника транспорта. — 2023. — № 4. — С. 69–75.

15. Зяблов Д. В. Определение нагруженности котла цистерны при пожаре с учетом геометрической нелинейности / Д. В. Зяблов, С. В. Беспалько // Транспортное машиностроение. — 2024. — № 1(25). — С. 44–52. — DOI: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52.

Дата поступления: 02.07.2025

Решение о публикации: 10.08.2025

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна — старший преподаватель; liuba.martinenko@yandex.ru

КАРБУШЕВА Арина Павловна — студент; karbusheva.arina@mail.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, проф.; d_kononov@mail.ru

Assessing the Tank Car Boiler's Strength in the Event of Liquid Cargo Displacement

L. V. Martynenko¹, A. P. Karbusheva¹, D. P. Kononov²

¹Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Martynenko L. V., Karbusheva A. P., Kononov D. P. Assessing the Tank Car Boiler's Strength in the Event of Liquid Cargo Displacement // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 657–666. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-657-666

Summary

Purpose: To evaluate the strength of the tank car boiler during the transportation of liquid cargo. **Methods:** The Femap software package was used to determine the stress-strain state of the tank car boiler during the transportation of liquid cargo. The simulation of the behavior of virtual parts, components, and systems under loads and the assessment of their response to a given impact was facilitated by this. **Results:** A new method has been created to calculate a tank car boiler using the stress intensity factor. The stress intensity factor is directly dependent on the three components of the stress-strain state distribution and the reduction of pressure in the area of the boiler cantilever fixture (support on the sleepers) with maximum pressure. The stress tensor at the boiler attachment point has been identified. It depends not only on the specific features of the fixture but also on the displacement of the liquid cargo during movement that can lead to tank car instability. **Practical significance:** Calculations based on the proposed methodology will allow simulating the actual behavior of a tank car boiler during the transportation of liquid cargo and provide a clear picture of the distribution and concentration of stresses in any node or part, which is one of the main objectives in the design of tank cars.

Keywords: Tank car, strength, stress-strain state, stress tensor.

References

1. Gridyushko V. I., Krivoruchko N. Z., Bugaev Z. P. *Vagonnoe khozyaystvo* [Carriage stock: textbook]. Moscow: Transport Publ., 1988. (In Russian)

2. Ustich P. A. (Ed.) *Vagonnoe khozyaystvo* [Carriage stock: textbook]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. (In Russian)

3. Tsyganskaya L. V., Beyn D. G., Atamanchuk N. A. O prichinakh deformatsii obechayki kotlov vagonov-tsistern dlya vyazkikh nefteproduktov [On the causes of deformation

of the shell of tanks in tank cars for viscous petroleum products]. *Byulleten' rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2024, Iss. 4, pp. 24–39. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39. (In Russian)

4. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Korzhin S. N., Ibodulloev Sh. R. Otsenka ustoychivosti tsilindricheskoy obolochki kotla tsisterny s uchetom zapolneniya ee zhidkim gruzom [Assessment of the stability of the cylindrical shell of a tank car with consideration of filling it with liquid cargo]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2021, Iss. 4(71), pp. 40–45. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45. (In Russian)

5. Surnin A. Yu., Melanin V. M., Bepalko S. V. Otsenka vliyaniya razlichnykh faktorov na velichinu ostatochnykh deformatsiy v kotle vagona tsisterny pri deystvii staticheskoy nagruzki ot vesha zhidkogo gruzha [Assessment of the influence of various factors on the magnitude of residual deformations in the tank of a tank car under static load from the weight of liquid cargo]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Tret'ey Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Tashkent, 17–20 aprelya 2024 goda* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 17–20, 2024]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2024, pp. 402–411. (In Russian)

6. Surnin A. Yu., Bepalko S. V. K voprosu o modelirovanii razrusheniya kotla zheleznodorozhnoy tsisterny udarom dugami bezopasnosti pri oprokidyvanii [On the issue of modeling the destruction of a railway tank car boiler by safety arc impact during capsizing]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2022, Iss. 4(75), pp. 21–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-21-27. (In Russian)

7. Gromakov M. S., Bepalko S. V., Kornienko N. A., Kolokolchikova L. V. Modelirovanie poperechnykh kolebaniy zhidkosti v tsisterne s primeneniem model'nogo eksperimenta [Modeling of transverse oscillations of liquid in a tank using a model experiment]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management]. 2021, Iss. 5, pp. 8–15. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-05-2. (In Russian)

8. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Korzhin S. N. Otsenka ustoychivosti kotla tsisterny na osnove variatsionnogo printsipa Lagranzha [Assessment of the stability of the tank car shell based on the Lagrange variational principle]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2022, Iss. 2, pp. 39–46. (In Russian)

9. Surnin A. Yu., Bepalko S. V. Modelirovanie ostatochnykh deformatsiy kotla vagona-tsisterny na osnove teorii polzuchosti [Modeling of residual deformations of the tank car shell based on the theory of creep]. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport engineering]. 2023, Iss. 7(19), pp. 66–76. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76. (In Russian)

10. Ruchkin V. B., Kornienko N. A., Bepalko S. V. Opredelenie dinamicheskoy nagruzhennosti kotla zheleznodorozhnoy tsisterny s primeneniem spetsializirovannykh konechnykh elementov [Determination of dynamic loading of a railway tank car shell using specialized finite elements]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 25 maya 2023 goda* [Intelligent transport systems: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 25, 2023]. Moscow: Russian University of Transport Publ., 2023, pp. 637–643. DOI: 10.30932/9785002182794-2023-637-643. (In Russian)

11. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Kodirov N. S. Variant predstavleniya razreshayushchego uravneniya polubezmomentnoy teorii krugovykh tsilindricheskikh obolochek v forme Donnella dlya raschetov napryazhennogo sostoyaniya i ustoychivosti kotlov vagonov-tsistern [Variant of representation of the resolving equation of the semi-moment theory of circular cylindrical shells in Donnell's form for stress-strain analysis and stability calculations of tank car shells]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Tashkent, 19–22 aprelya 2023 goda* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 19–22, 2023]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2023, pp. 114–119. (In Russian)

12. Tsyganskaya L. V., Smirnov A. N., Atamanchuk N. A. et al. Vybór skhem nagruzheniya dlya ispytaniy dlinnobaznogo podvizhnogo sostava [Selection of loading schemes for testing long-base rolling stock]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy KhVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, Saint Petersburg, August 21–24, 2023]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2024, pp. 222–223. (In Russian)

13. Gromakov M. S., Bepalko S. V., Mironenko O. I., Zyablov A. V. Otsenka sil davleniya zhidkosti na bokovuyu stenku kotla tsisterny pri poperechnykh kolebaniyakh kuzova [Assessment of fluid pressure forces on the side wall of the tank car shell during transverse body oscillations]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2021, Iss. 3, pp. 10–13. DOI: 10.53883/20749325_2021_03_10. (In Russian)

14. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Korzhin S. N., Ibodulloev Sh. R. Opredelenie prodol'noy sily, deystvuyushchey na obolochku kotla bezramnoy tsisterny pri

stolknovenii s zhestkim prepyatstviem [Determination of longitudinal force acting on the shell of a frameless tank car during collision with a rigid obstacle]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2023, Iss. 4, pp. 69–75. (In Russian)

15. Zyablov D. V., Bepalko S. V. Opredelenie nagruzhennosti kotla tsisterny pri pozhare s uchetom geometricheskoy nelineynosti [Determination of tank car shell loading during fire considering geometric nonlinearity]. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport engineering]. 2024, Iss. 1(25), pp. 44–52. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52. (In Russian)

Received: July 02, 2025

Accepted: August 10, 2025

Author's information:

Lyubov' V. MARTYNENKO — Senior Lecturer;
liuba.martinenko@yandex.ru

Arina P. KARBUSHEVA — Student;
karbusheva.arina@mail.ru

Dmitry P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; d_kononov@mail.ru