

И. И. Лаптева, Я. В. Жатченко, Гао Хэ

ТРЕХМЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ НА ПРОЧНОСТЬ

Аннотация. Основной целью данного исследования является анализ прочности конструкции котла цистерны на основе методов механического расчета и соответствующих стандартов для обеспечения его безопасности и надежности при рабочем давлении и условиях эксплуатации. Основная цель расчёта прочности – гарантировать безопасную работу котла при рабочих давлениях и температурах, предотвращая аварии, вызванные отказом материала или разрушением конструкции. Расчёт прочности позволяет определить оптимальную толщину стенок, распределение напряжений и прочность сварных соединений, чтобы избежать концентрации напряжений, деформаций и появления трещин. Расчёт прочности помогает выбрать наиболее подходящие материалы и толщину стенок, что позволяет снизить затраты на производство, сохранив при этом высокий уровень безопасности и надёжности конструкции.

Ключевые слова: цистерна-контейнер, прочность, транспорт, срок службы, оптимизация конструкции.

Для цитирования: Лаптева, И. И. Трёхмерное проектирование и механический расчет котла цистерны на прочность. / И. И. Лаптева, Я. В. Жатченко, Гао Хэ // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 130–136. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_130.

Контейнерный транспорт обладает такими преимуществами, как высокая грузоподъемность, низкая стоимость перевозки и высокая эффективность транспортировки. Поэтому этот вид транспорта широко используется в морских и автомобильных перевозках по всему миру. Цистерна-контейнер – это тип контейнера, используемый для хранения и транспортировки различных газов, жидкостей и сухих порошков. Цистерна-контейнер обычно состоит из двух частей: корпуса и рамы. Цистерна представляет собой сосуд под давлением. Иногда внутри резервуара устанавливаются ударопрочные пластины для снижения инерционного эффекта при транспортировке жидкостей. Оболочка оснащается предохранительными клапанами для аварийного отключения (запорные краны, шаровые краны и другие компоненты арматуры), а также датчиками уровня, манометрами, термометрами и другим измерительным и испытательным оборудованием для обеспечения безопасности емкости при транспортировке и использовании. По сравнению с традиционным видом транспорта цистерны-контейнеры имеют значительные преимущества, такие как небольшие единовременные инвестиции, большая грузоподъемность, низкие транспортные расходы, что соответствует международным тенденциям. Однако с быстрым развитием отрасли количество контейнеров увеличивается, все чаще происходят аварии при контейнерных перевозках, наносящие неизмеримый ущерб стране и людям. Это связано с тем, что условия эксплуатации контейнеров очень специфичны. Материалы, перевозимые в контейнерах, обычно представляют собой высокотоксичные, взрывоопасные и легковоспламеняющиеся химические вещества и химикаты, а сами контейнеры подвергаются различным динамическим и статическим нагрузкам во время погрузки, погрузочно-разгрузочных работ и транспортировки.

В случае разрыва или деформации цистерны, приводящей к утечке токсичных веществ, это может привести к невообразимым последствиям. Поэтому особенно важно обеспечить достаточную прочность контейнеров при транспортировке.

Цель расчёта прочности котла цистерны:

1. Обеспечение безопасности эксплуатации;
2. Проверка обоснованности конструкции;
3. Соответствие нормативным требованиям;
4. Увеличение срока службы;
5. Оптимизация выбора материалов и снижение затрат.

С бурным развитием современных промышленных и производственных технологий растет потребность в проектировании высококачественных, высокоуровневых, крупных, сложных и совершенных машин и инженерных сооружений. Для этого необходимы эффективные средства точного прогнозирования напряжений, деформаций и перемещений, которые будут возникать при эксплуатации машин и инженерных конструкций в будущем. Однако некоторые традиционные методы часто оказываются неэффективными при анализе практических инженерных задач. Из-за сложности решения краевых задач для дифференциальных уравнений классическая теория упругости может решать только относительно простые задачи, такие как форма конструкции и ее несущая способность. Задачи со сложной геометрией, неровными границами, трещинами или изменениями толщины, а также с геометрической и материальной нелинейностью, как правило, сталкиваются со многими проблемами. Получение аналитических решений с помощью классических методов эластодинамики очень сложно, а иногда и невозможно. Поэтому необходимо найти простой и точный метод численного анализа. Метод конечных элементов (МКЭ) – это очень эффективный метод численного расчета, который был создан и развит для удовлетворения этого требования.

Конструктивные параметры и условия загрузки контейнеров-цистерн при расчете методом МКЭ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры контейнера-цистерны 1BB

Название параметра	Значение	Название параметра	Значение
Модель продукта	GX32HFA	Рабочая температура	-40~65°C
Тип контейнера	1BB	Диаметр резервуара	2365mm
Размеры (мм)	6000×2432×2591	Объем содержимого резервуара	38m ³
Заполняющая среда	Безводный фтористый водород (АНФ)	Толщина стенки цилиндра	12mm
Расчетное давление	0.7MPa	Толщина стенки головки	10mm
Выдерживать испытательное давление под давлением	1.05MPa	Материал резервуара	09Г2С
Средняя плотность	822kg/m ³	Материал юбки	16MnR
Качество корпуса коробки	9570kg	Материал угловой стойки рамы	Q345
Масса резервуара	7685kg	Рама (кроме угловых стоек)	20
Максимальная грузоподъемность	26430kg	Предел коррозионной стойкости	3mm
Максимальная общая масса	36000kg	Допустимое качество укладки	192000kg

Инерционная сила нагружения разделена на три следующих сценария:

- в горизонтальном направлении перпендикулярно направлению движения – общая масса (если направление движения невозможно точно определить, максимально допустимая сила нагрузки должна быть в два раза больше общей массы);
- при хранении – пятикратное превышение общей массы (на штабеля действует пятикратная сила тяжести);
- при разгрузке краном.

Статические нагрузки, действующие на цистерну: собственный вес резервуара – вес конструкции резервуара (включая оболочку, теплоизоляцию, опорные элементы и т.д.).

Динамические нагрузки:

- инерционные силы: силы, возникающие при ускорении, перемещении, остановке или раскачивании краном;
- коэффициент динамичности обычно принимается 1,5–2,0 (согласно стандартам ISO 4306 или GB/T 3811);
- ударные/колебательные нагрузки: резкие остановки или влияние ветра могут создавать дополнительные ударные нагрузки. Риски минимизируются за счет плавности операций.

Далее будет определена величина и направление силы инерции на основе соответствующих положений Международного кодекса морской перевозки опасных грузов и Правил проверки контейнеров Китайского классификационного общества, рассмотрены силы инерции как статические нагрузки, рассчитано напряжение контейнера при нормальных и низких температурах, а также классифицировано напряжение в соответствии со стандартами анализа и проектирования стальных сосудов под давлением, рассчитана интенсивность напряжения и выполнена проверка прочности, конечно-элементная модель котла-цистерны 1ВВ представлена на рисунке 1.

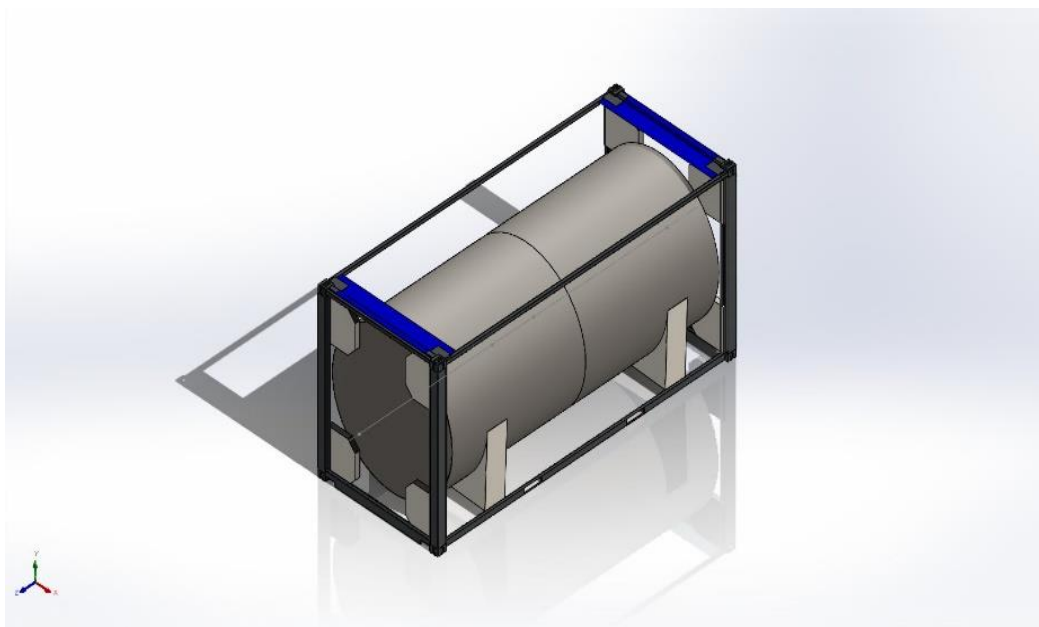


Рис. 1. Конечно-элементная модель котла-цистерны 1ВВ

В качестве основы для проверки прочности контейнеров-цистерн будут приняты соответствующие положения JB4732-95 «Стальные сосуды под давлением. Стандарт анализа и проектирования». В соответствии с положениями JB4732-95 «Стальные сосуды под давлением. Стандарты анализа и проектирования» при проверке прочности применяется

теория максимального напряжения сдвига, а интенсивность напряжения должна быть в два раза больше максимального напряжения сдвига:

$$S = \max\{|S_{12}|, |S_{23}|, |S_{31}|\} , \quad (1)$$

где S – интенсивность стресса; σ_1 , σ_2 , σ_3 – основное напряжение.

Первичная общая интенсивность мембранных напряжений S_I не должна превышать расчетного значения интенсивности напряжений kS_m :

$$S_I \leq kS_m. \quad (2)$$

Допустимое значение первичной местной прочности пленки S_{II} составляет $1.5kS_m$:

$$S_{II} \leq 1.5kS_m. \quad (3)$$

Допустимое значение интенсивности напряжений S_{III} первичного местного мембранного напряжения плюс первичное изгибное напряжение составляет $1.5kS_m$:

$$S_{III} \leq 1.5kS_m. \quad (4)$$

Допустимое значение интенсивности напряжений S_{IV} первичного местного мембранного напряжения плюс первичное изгибное напряжение и вторичное напряжение составляет $3kS_m$:

$$S_{IV} \leq 3kS_m. \quad (5)$$

Допустимое значение интенсивности напряжений S_V первичного локального напряжения плюс вторичное напряжение и пиковое напряжение равно S_a :

$$S_V \leq S_a, \quad (6)$$

где k – коэффициент сочетания нагрузок, для этого анализа $k=1$; S_m – расчетная интенсивность напряжений материала при расчетной температуре; S_a – допустимое значение интенсивности усталостных напряжений материала при определенном числе циклов.

Для получения $S_I \sim S_V$ следует выбрать наиболее опасные точки напряжения, чтобы получить результаты на основе структуры компонента, формы нагрузки и результатов расчета методом конечных элементов.

Корпус резервуара изготовлен из материала 09Г2С, расчетная прочность материала при комнатной температуре составляет 154 МПа. Материал юбки — 16MnR, расчетная прочность материала при комнатной температуре составляет 196 МПа. Материал угловых колонн каркаса – Q345, предел текучести материала при комнатной температуре σ_s – 345 МПа, предел прочности на растяжение σ_b – 470 МПа. Расчетное значение интенсивности напряжений составляет (меньшее значение между $\sigma_s/1,5$ и $\sigma_b/2,6$) 181 МПа. Материал остальных частей рамы – 1020, расчетная прочность материала при комнатной температуре – 150 МПа.

Результаты проверки прочности контейнеров-цистерн, заполненных грузом в нормальных температурных условиях при четырех рабочих состояниях, приведены в таблице 2 для первого рабочего условия.

Приведенные выше результаты показывают, что согласно JB4732-95 «Стальные сосуды под давлением. Стандарт анализа и проектирования» при нормальных температурных условиях контейнер, подвергнутый воздействию инерционной силы, соответствует требованиям прочности. Диаграммы результатов конечно-элементного анализа представлены на рисунках 2-3.

Таблица 2

Результаты расчета прочности на напряжение и проверка в 1 рабочем условии

Проверить позицию	Тип интенсивность и напряжения	Значение (МПа)	Допустимое значение (МПа)	Результаты проверки
Середина головы	S_I	92.5	154	удовлетворяет
	S_{III}	97.9	231	удовлетворяет
Середина цилиндра	S_I	71.1	154	удовлетворяет
	S_{III}	74.5	231	удовлетворяет
Соединение между продольной балочной опорой и цилиндром	S_{II}	61.6	231	удовлетворяет
	S_{IV}	151	462	удовлетворяет
Каркас в целом (без угловых колонн)	S_I	60	150	удовлетворяет
	S_{III}	62.8	225	удовлетворяет
Часть каркаса (без угловых колонн)	S_{II}	211	225	удовлетворяет
	S_{IV}	367	450	удовлетворяет
Угловая колонна торцевой рамы	S_I	52.3	181	удовлетворяет
	S_{III}	101	271.5	удовлетворяет
Часть угловой колонны торцевой рамы	S_{II}	213	271.5	удовлетворяет
	S_{IV}	447	543	удовлетворяет

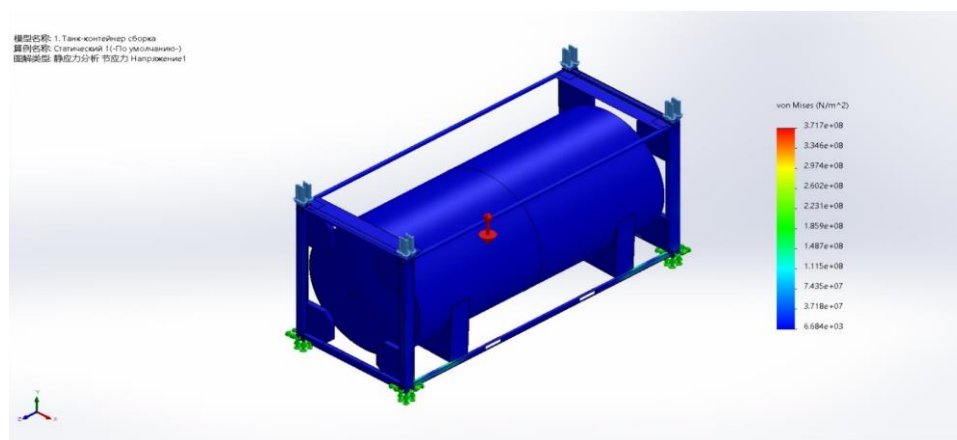


Рис. 2. Диаграмма облака анализа напряжений

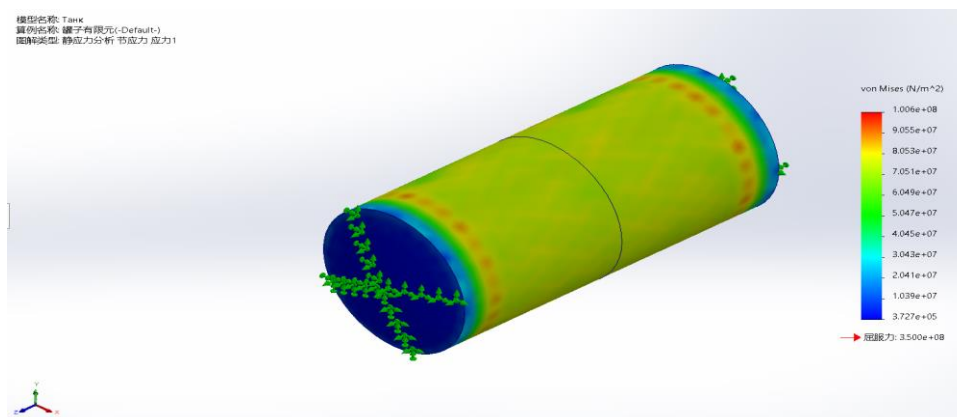


Рис. 3. Облачная диаграмма анализа деформации

Приведенные выше результаты показывают, что согласно JB4732-95 «Стальной сосуд под давлением анализ стандарта проектирования» в условиях низких температур, за счет инерционной силы резервуар удовлетворяет требованиям прочности.

Результаты расчетов показывают, что: при комнатной температуре и при низкой температуре -40°C , загруженной товарами, в четырех условиях прочность котла-цистерны 1ВВ находится в диапазоне допустимых значений, что позволяет удовлетворить требования к прочности, предъявляемые проектом. Кроме того, установлено, что интенсивность напряжений в котле-цистерне в основном определяется внутренним давлением; интенсивность напряжений в раме определяется величиной и направлением силы инерции.

Список литературы

1. ГОСТ Р. 34233.6-2017. Сосуды и аппараты //Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. М.: Стандартиформ. – 2019.
2. **Абдрахманов Д. М. и др.** Изменения и нововведения в требованиях к сосудам и аппаратам, работающим под давлением //Вестник науки и образования. – 2016. – №. 4 (16). – С. 13-15.
3. Расчет на прочность легкового прицепа общего назначения при загрузке прицепа сыпучим грузом с использованием компьютерных программных средств проектирования SOLIDWORKS Simulation. Кузин Е., Сульдин С., Митин Э., Митина А. // САПР и графика. 2017. № 4 (246). С. 2527.
4. **Chen Q.** Research on the dynamics of urban rail vehicles using asymmetric bogies. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2008. 25 p.
5. **Lv H.** Design and dynamic performance study of suspension vehicle wheel side motor bogie. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2020. 22 p.
6. **Wang Y Z.** Overall scheme design and dynamic performance study of 200 km/h high speed freight car inner axle box bogie. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2019. 19 p.
7. **Wang W D, Li K S.** Analysis of the influence of bogie wheelbase error on the linear dynamics performance of vehicles // China Railway Science. 1995. № 4. P. 88-101.
8. **Yang X.** Overall design and dynamic performance study of 160 km/h axle box bogie. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2018. 24 p.

References

1. GOST R 34233.6-2017. Vessels and apparatus // Standards and methods for strength calculation. Strength calculation under low-cycle loads. Moscow: Standartinform. – 2019.
2. **Abdrakhmanov D. M. et al.** Changes and innovations in the requirements for vessels and apparatuses operating under pressure // Bulletin of Science and Education. - 2016. - No. 4 (16). - P. 13-15.
3. Strength calculation of a general-purpose light-duty trailer when loading the trailer with bulk cargo using SOLIDWORKS Simulation computer design software. Kuzin E., Sul'din S., Mitin E., Mitina A. // CAD and graphics. 2017. No. 4 (246). P. 2527.
4. **Chen Q.** Research on the dynamics of urban rail vehicles using asymmetric bogies. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2008. 25 p.
5. **Lv H.** Design and dynamic performance study of suspension vehicle wheel side motor bogie. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2020. 22 p.
6. **Wang Y Z.** Overall scheme design and dynamic performance study of 200 km/h high speed freight car inner axle box bogie. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2019. 19 p.
7. **Wang W D, Li K S.** Analysis of the influence of bogie wheelbase error on the linear dynamics performance of vehicles // China Railway Science. 1995. № 4. P. 88-101.
8. **Yang X.** Overall design and dynamic performance study of 160 km/h axle box bogie. Abstract of Ph. D. thesis. South-West Jiao-Tong University. Chengdu, 2018. 24 p.

I. I. Lapteva, Ya. V. Zhatchenko, Gao He

3D DESIGN AND MECHANICAL STRENGTH CALCULATION OF A TANK BOILER

Abstract. The primary objective of this study is to analyze the structural strength of a tank boiler using mechanical calculation methods and relevant standards to ensure its safety and reliability under operating pressures and conditions. The primary goal of the strength calculation is to ensure safe operation of the boiler at operating pressures and temperatures, preventing accidents caused by material failure or structural failure. Strength calculations help determine the optimal wall thickness, stress distribution, and weld strength to avoid stress concentration, deformation, and cracking. Strength calculations help select the most appropriate materials and wall thicknesses, reducing production costs while maintaining a high level of structural safety and reliability.

Keywords: tank container, strength, transport, service life, design optimization.

For citation: Lapteva, I. I. 3D Design and Mechanical Strength Calculation of a Tank Boiler. / I. I. Lapteva, Ya. V. Zhatchenko, Gao He // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. – 2026. – № 1. – P. 130–136. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_130.

Сведения об авторах

Лаптева Ирина Ивановна

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения,
кафедра «Транспорт железных дорог»,
старший преподаватель,
e-mail: irinlapteva@mail.ru

Жатченко Ярослав Валерьевич

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения,
кафедра «Транспорт железных дорог»,
старший преподаватель,
e-mail: zhatchenko@yandex.ru

Гао Хэ

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения,
магистрант группы MO121НТК

Information about the authors

Lapteva Irina Ivanovna

Far Eastern State Transport University,
Chair «Railway Transport»,
Senior Lecturer,
e-mail: irinlapteva@mail.ru

Zhatchenko Yaroslav Valerievich

Far Eastern State Transport University,
Chair «Railway Transport»,
Senior Lecturer,
e-mail: zhatchenko@yandex.ru

Gao He

Far Eastern State Transport University,
Master's Student of the MO121НТК group