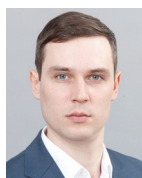


Влияние конструкции крепления котла к каркасу на напряженно-деформированное состояние контейнера-цистерны



А. В. Калугин,
руководитель отдела
«Наливные цистерны»
ООО «Всероссийский научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ВНИЦТТ)



Е. Г. Пасько,
к. ф.-м. н.,
старший инженер-исследователь ВНИЦТТ



С. А. Федоров,
к. т. н., директор
дирекции проектирования
грузовых вагонов
ВНИЦТТ



Д. В. Шевченко,
к. т. н., директор
научно-исследовательской
дирекции
ВНИЦТТ



В. А. Шнек,
ведущий
инженер-конструктор
ВНИЦТТ

В связи с увеличением допустимой массы контейнеров в стандарте ISO возникает необходимость пересмотра общепринятых технических решений контейнеров-цистерн с целью обеспечения их прочности без существенного увеличения тары. Рациональный выбор конструктивного решения контейнеров-цистерн должен быть сделан на начальном этапе проектирования при помощи математического моделирования.

Перевозка наливных грузов занимает четвертую часть в общем объеме железнодорожных перевозок на пространстве колеи 1520 мм и характеризуется устойчивым ростом. Сегодня для перевозки жидких грузов грузоотправители все чаще используют вместо традиционных вагонов-цистерн контейнеры-цистерны [1].

Парк контейнеров-цистерн для перевозки наливных грузов представлен в основном устаревшими образцами зарубежного производства. Большинство из них характеризуются пониженной максимальной разрешенной массой брутто 30,48 т, например, контейнер-цистерна модели AFR200/30 IP-8 производства Arbel Fauvet Rail (Франция). В последних отечественных и зарубежных разработках контейнеров-цистерн допустимая масса брутто составляет 36 т [2].

Увеличение массы контейнеров, высокая интенсивность перевозок, многократная смена видов транспорта повышают вероятность повреждений контейнеров-цистерн (рис. 1). Для их поддержания в исправном состоянии нужен все больший объем сервисных работ, собственники вынуждены увеличивать затраты на текущие ремонты.

Распространены такие скрытые виды повреждений, как трещины в элементах крепления каркаса к котлу, отрывы продольных раскосов, трещины в продольных балках. Нередки повреждения контейнеров-цистерн в случае аварий и инцидентов при перестановке с одного вида транспорта на другой.

Таким образом, постоянное совершенствование конструкции контейнеров для перевозки наливных грузов с целью обеспечения безопасности их эксплуатации

представляет собой важную задачу. Этот вопрос весьма актуален для отечественных производителей, имеющих значительно меньший опыт разработки и производства указанной продукции по сравнению с китайскими и европейскими поставщиками.

Объектом разработки ООО «ВНИЦТТ» стал контейнер-цистерна наиболее распространенного габарита 1СС (20 футов), предназначенный для перевозки жидких химических и нефтяных грузов [2, 4]. Указанный типоразмер контейнера — наиболее востребованный и удобный транспортный модуль, для его транспортировки пригодны железнодорожные и автомобильные транспортные средства, морские и речные суда. С учетом выбранной номенклатуры грузов для цистерны установлен код UN T20, определяющий испытательное давление в котле 10 бар и верхнее расположение арматуры [2–7]. Максимально разрешенная масса брутто составляет 36 т [2].

Приступая к проектированию новой конструкции контейнера, сотрудники ООО «ВНИЦТТ» провели анализ стандартов и их требований к конструкции контейнеров-цистерн. Требования к значениям нагрузок, допускаемых напряжений и толщины изложены в международных правилах [2, 3, 5–7] и нормативной документации РФ [4, 8].

Контейнер-цистерны должны поддерживать как статические режимы нагружения (штабелирование, подъем за верхние и нижние фитинги, поперечный и продольный перекосяк и т. д.), так и режимы, связанные с воздействием сил инерции перевозимого груза, возникающих при движении транспортного средства [3, 4]. При эксплуатации контейнеров в РФ должны быть приняты следующие силы



Рис. 1. Контейнер-цистерна, получивший повреждения при аварии

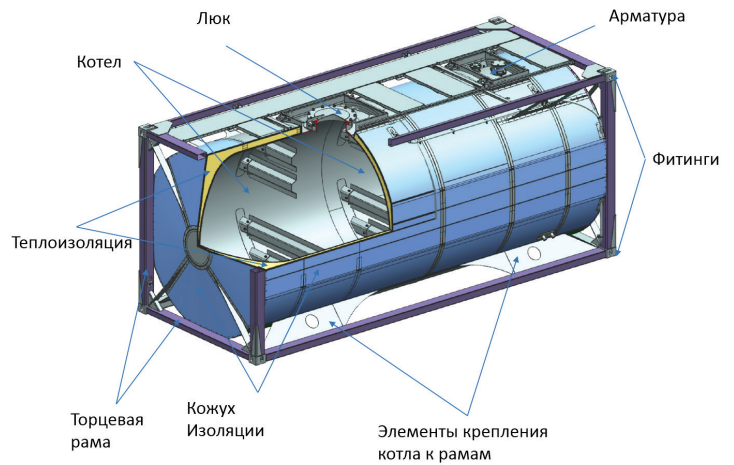
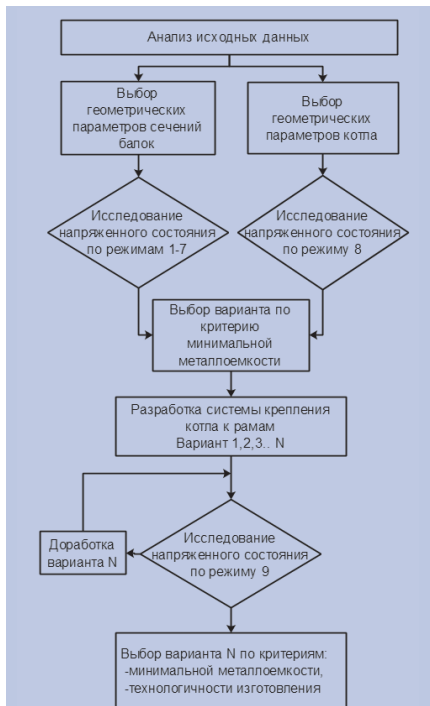


Рис. 2. Контейнер-цистерна для жидких грузов



Номер расчетного режима	Наименование
1-7	Подъем контейнера за верхние и нижние угловые фитинги, штабелирование с эксцентриситетом, перекос в продольном и поперечном направлении, продольное крепление, поперечное крепление
8	Испытание на прочность давлением
9	Динамические испытания

Рис. 3. Алгоритм методики проектирования контейнера-цистерны

инерции: Rg — в поперечном направлении (R — максимальная масса контейнера брутто; g — ускорение свободного падения); $4Rg$ — в продольном; $2Rg$ — в вертикальном направлении [4].



Рис. 4. Контейнеры-цистерны рамной системы

Процесс проектирования контейнера-цистерны определен особенностями конструкции, которая в общем случае включает каркас, несущий нагрузки, и котел, предназначенный для размещения груза (рис. 2). Каркас включает в себя торцевые рамы, образованные трубами квадратного сечения с установленными по углам грузозахватными фитингами, и элементы крепления к ним котла.

С учетом приведенных особенностей проектирования конструкции численное исследование напряженно-деформированного состояния можно разделить на два этапа. На первом этапе с учетом анализа напряженного состояния, возникающего под действием статических нагрузок, выполняется предварительный выбор геометрии и толщины элементов котла, подбор толщины и сечений элементов торцевых рам. На втором этапе проектируется система соединения котла с рамами и оценивается прочность при воздействии сил инерции.

Полученный в ходе проектирования контейнеров-цистерн опыт был формализован в виде методики для создания конструкций пониженной материалоемкости, удовлетворяющих нормативным требованиям (рис. 3).

На основании обзора существующих конструкций и анализа публикаций [9] выявлены две принципиально различные системы восприятия продольных нагрузок

конструкцией контейнера-цистерны. В одной системе восприятие продольных нагрузок осуществляется несущим каркасом, образованным торцевыми рамами, которые соединены продольными балками. Такую систему называют рамной (рис. 4).

В другой системе, называемой безрамной (или цельнонесущей), котел, к которому крепятся торцевые рамы, выступает полноценным элементом, воспринимающим продольные нагрузки (рис. 5).

Выбор той или другой системы восприятия продольных сил, безусловно, влияет на дальнейшую реализацию проекта. Однако в любом случае необходимо найти решение, позволяющее выполнить соединение котла с другими элементами контейнера-цистерны.

Система крепления котла должна обеспечивать прочность при динамическом нагружении. Наиболее высокий уровень нагрузок, приходящихся на контейнер в эксплуатации, отвечает режиму роспуска вагона-платформы с установленным на нем контейнером с сортировочных горок [10], что соответствует действию сил инерции в продольном направлении.

Таким эксплуатационным условиям соответствует режим динамических испытаний с реализуемым усилием $4Rg$ в продольном направлении [4]. В связи с этим на начальном этапе проектирования для предварительной оценки напряженно-де-

формированного состояния тех или иных вариантов системы крепления котла с рамой и с целью экономии времени определения наиболее перспективного решения из множества первоначальных конструкций был выбран только этот режим нагружения.

Всего было рассмотрено четыре варианта конструкции рамной системы крепления и два варианта — безрамной (рис. 6). В первом варианте модель контейнера имеет прямые продольные балки, элементы крепления в виде гнутых листов, связывающих котел с верхними и нижними частями стоек и с концевыми частями поперечных балок торцевой рамы. Модель контейнера по варианту 2 включает в себя переходные обечайки, связывающие днища котла и торцевые рамы, подкрепленные раскосами. Кроме того, для восприятия продольной нагрузки котел имеет опоры, соединяющие обечайку с продольными балками.

Вариант 3 по сравнению с предыдущим имеет раскосы, жестко соединенные одним концом с нижней частью котла, а другим концом заделанные в угловые фитинги. Вариант 4 рамной конструкции отличается от ранее рассмотренных тем, что крепление цистерны к несущему каркасу выполнено с помощью:

- двух нижних листов (ребер), расположенных с каждой стороны цистерны и соединяющих нижнюю часть обечайки цистерны и нижние продольные балки несущего каркаса;
- четырех верхних листов, расположенных попарно с каждой стороны цистерны и соединяющих верхнюю часть обечайки цистерны и верхние продольные балки несущего каркаса;
- четырех раскосов на каждом днище, соединяющих его с угловыми фитингами торцевой рамы.

Модель цельнонесущего контейнера (вариант 5) характеризуется опорами коробчатой формы, соединяющими угловые фитинги с нижней частью днища и обечайки котла. Для включения в работу торцевых рам применены переходные обечайки (аналогично варианту 2).

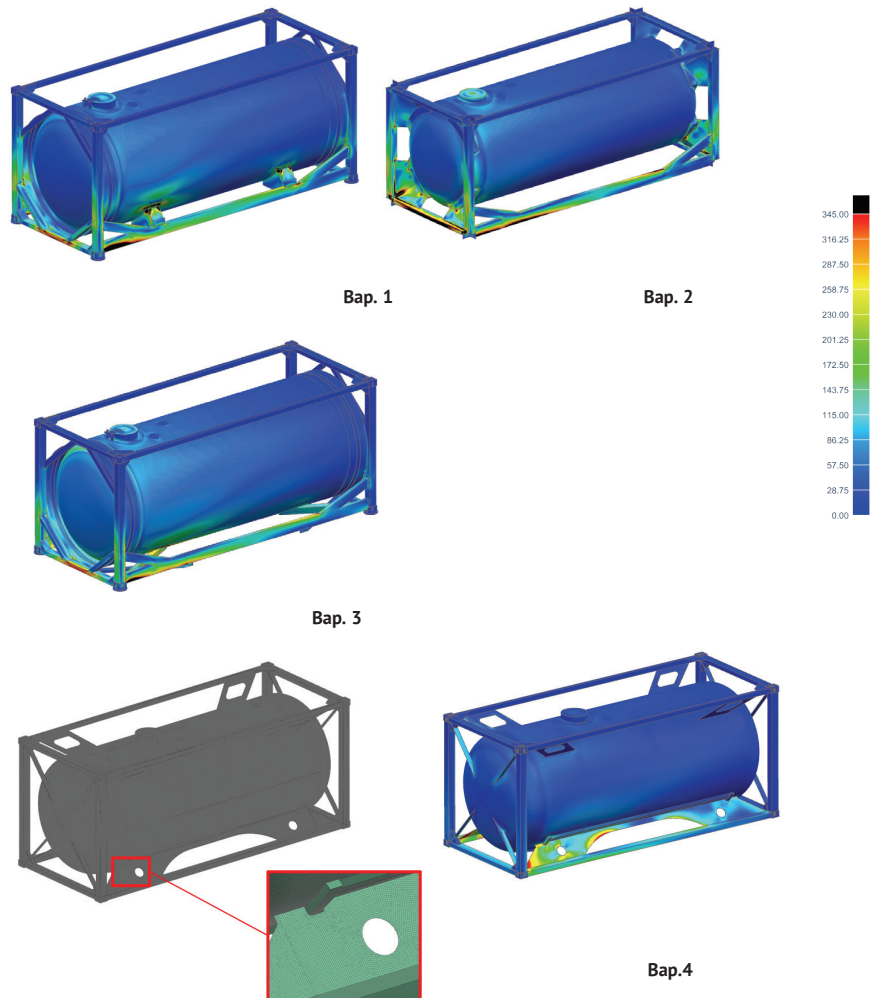
Модель цельнонесущего контейнера по варианту 6 имеет верхние раскосы из квадратной трубы, связывающие верхнюю часть котла и верхние фитинги, и нижние и средние раскосы, заделанные в среднюю и нижнюю части обечайки котла и нижние фитинги.

Численные исследования, позволяющие оценить прочность модельных образцов конструкции контейнера, проводили с использованием специализированной



Рис. 5. Контейнеры-цистерны цельнонесущей системы

Рамная система



Безрамная система

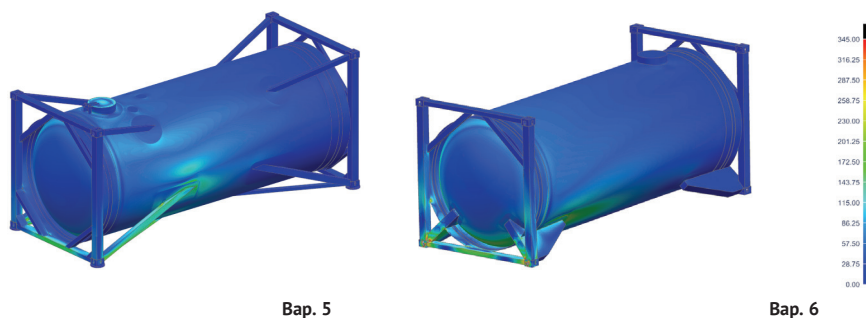


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в элементах конструкции для рамной (вверху) и безрамной (внизу) системы крепления

программной системы конечно-элементного анализа Siemens NX. В расчетной модели учитывались твердотельные упорные плиты. В процессе моделирования учитывалось контактное взаимодействие по поверхностям фитингов и ответным поверхностям плит, а также их упоров. При таком подходе асимметрия усилий вследствие неравных зазоров между фитингами и упорами платформы может реализовываться в процессе деформирования изменением геометрии модельного образца (не исследовали в настоящей работе).

В результате многовариантных расчетов получены распределения эквивалентных напряжений, возникающих в материале конструкций (рис. 6).

Деформирование крепления контейнеров рамной системы (варианты 1–3) при воздействии продольной силы инерции сходно и обусловлено жесткой связью торцевых рам продольными балками. Области концентрации напряжений реализуются на нижних поверхностях продольных балок, поперечной балке и соединениях с котлом. Максимальные значения напряжений в указанных областях превышают допустимые и не удовлетворяют условию прочности. Дальнейшее усиление этих вариантов в части рамы признано нецелесообразным вследствие превышения требуемой массы тары. Максимальные значения эквивалентных напряжений, реализуемые в материале модельного образца (вариант 4), не превышают допустимых. Области концентрации напряжений преобладают на наружной и внутренней кромке раскосов. Масса конструкции не превышает заданного при проектировании значения.

Максимальные значения эквивалентных напряжений в модельных образцах безрамной системы крепления (варианты 5, 6) не превышают допустимых значений. Области концентрации напряжений сосредоточены в обечайке котла: в соединениях с опорой коробчатой формы (вариант 4) и раскосами квадратной трубы (вариант 5). Выполнение условия прочности в моделях безрамной конструкции достигается использованием усилений в виде накладок котла, способствующих снижению значений напряжений в областях концентрации.

Количественную оценку результатов расчета прочности удобно представить в виде безразмерного коэффициента запаса прочности $k_{зп} = \frac{\sigma_{доп}}{\sigma_э}$, где $\sigma_{доп}$ — предельно допустимое значение напряжений, МПа;

Значения коэффициента запаса прочности

Вариант	Коэффициент запаса прочности		Соответствие условию прочности
	В элементах котла	В элементах рамы	
1	1,64	0,69	
2	1,32	0,63	«
3	1,22	0,71	«
4	1,51	1,10	Удовлетворительное
5	1,47	1,30	«
6	1,85	1,61	«

$\sigma_э$ — эквивалентное значение напряжений, МПа. Модельный образец конструкции $k_{зп} \geq 1$ удовлетворяет условиям прочности при значениях для всех элементов конструкции.

Значения коэффициентов запаса прочности в областях концентрации напряжений для элементов котла и рам приведены в таблице.

Несмотря на преимущества контейнеров-цистерн безрамной системы вследствие более простой конструкции и меньшей (на 100–150 кг) массы тары, выбор варианта для реализации в металле основывался и на выполнении дополнительного требования, связанного с безопасностью в аварийных ситуациях. Реализация рамной конструкции позволяет обеспечить дополнительную защиту сосуда от действия внешних механических факторов (например, при перегрузке с одного транспортного средства на другое). С учетом этого требования работа по созданию контейнера-цистерны была продолжена над конструкцией с рамной системой крепления (вариант 4).

Таким образом, определена конструкция контейнера-цистерны типа Т20, обеспечивающая:

- установленную заказчиком массу тары при выполнении требований к прочности несущей конструкции;
- дополнительную пассивную защиту котла от случайных ударов в аварийных ситуациях продольными балками между торцевыми рамами;
- технологичность в серийном изготовлении.

На технические решения, использованные в конструкции контейнера, получен патент на полезную модель [11].

Литература

1. Островский А. М., Лисютин А. М. Использование контейнеров-цистерн для перевозки наливных грузов // Совершенствование работы железнодорожного транспорта / отв. ред. А. М. Островский. Новосибирск: Изд-во Сибир. гос. ун-та путей сообщения, 2009. С. 25–33

2. ГОСТ Р 53350-2009 (ИСО 668:1995) Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса. Изм. 2. — Введ. 2010-01-01. — М.: Стандартинформ, 2018. — 15 с.

3. Международный кодекс морской перевозки опасных грузов. МКМПОГ. В 2-х томах. Включающий поправки 38-16. — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2016. — 1220 с.

4. Правила изготовления контейнеров. НД № 2-090201-009.—СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015

5. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов. Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк и Женева, 2010 г [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.unecce.org>

6. Конвенция о международных железнодорожных перевозках (КОТИФ) от 9 мая 1980 г. согласно тексту изменяющего Протокола от 3 июня 1999 г. (Вместе с Регламентом перевозки опасных грузов (РИД)) // СЗ РФ: 2011. № 35. Ст. 5060.

7. Рекомендации по перевозке опасных грузов» (ООН) Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк и Женева, 2013 [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.unecce.org>

8. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. — Введ. 1990-01-01. — М.: Стандартинформ, 2008. — 53 с.

9. Цыганская Л. В. Выбор варианта крепления котлов контейнеров-цистерн // Матер. III Межд. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». — СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2003. С. 28–32.

10. Бороненко Ю. П., Орлова А. М., Смирнов А. Н. Динамические испытания контейнеров при продольных соударениях // Опасн. грузы и контейнеры. 2004. № 1–2. С. 50–53.

11. Пат. 183945 Российская Федерация, МПК В65D 88/00 Контейнер-цистерна / Р. А. Савушкин и др.; патентообладатель Рейл 1520 АйПи ЛТД (СУ).— № 20181145135; заявл 19.04.2018; опубл. 09.10.2018., Бюл. № 28.— 7 с.