

На правах рукописи



Сурнин Артем Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОТЛА ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ПРИ
ДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНЫХ НАГРУЗОК**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Беспалько Сергей Валерьевич

Официальные оппоненты: **Третьяков Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», профессор;

Антипин Дмитрий Яковлевич
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», Учебно-научный институт транспорта, директор.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», г. Москва

Защита состоится 23 мая 2024 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан «__» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В России важное место в общем объеме грузооборота занимают железнодорожные перевозки. Это объясняется высокой экономической эффективностью железнодорожных цистерн и высокой потребностью промышленных отраслей в сырье. Одними из самых распространённых видов сырья являются различные химические вещества, перевозимые в железнодорожных цистернах и относящиеся к категории опасных грузов. Подобные цистерны должны обеспечивать экологическую безопасность при эксплуатации.

Поэтому необходимо уделять повышенное внимание поведению котла под нагрузками. Из-за длительного воздействия гидростатической нагрузки от перевозимого груза в металле возникает и развивается явление ползучести. В процессе эксплуатации в нижней зоне котла накапливаются остаточные деформации ползучести, что приводит к образованию карманов, которые препятствуют полной разгрузке цистерны. Неполная разгрузка цистерны снижает показатели суточной доходности вагона. Кроме того, растущая интенсивность использования вагонов, сокращение времени погрузки и разгрузки увеличивают интенсивность накопления деформаций, уменьшая срок службы котла.

Чтобы уменьшить влияния остаточных деформаций на работу котла цистерны, необходимо рассмотреть поведение котла при длительном воздействии постоянных нагрузок с учетом явления ползучести.

Другой важной проблемой является разрушение котла при ударных нагрузках. В аварийной ситуации при опрокидывании цистерны существует вероятность пробоя котла дугой безопасности. Стоит отметить то, что пробой котла неминуемо приводит к выбросу опасных веществ в окружающую среду. При этом аварийная ситуация неминуемо приводит к потере перевозимого груза и развивается до чрезвычайной.

Степень разработанности темы исследования. Рассмотрение процессов разрушения, возникающих в объектах при нагружении, началось с 15 века. Это

исследования Леонардо да Винчи, Галилео Галилея, Р. Гука, Э. Мариотте, Шарль Кулон, Я. Бернулли, П. Вариньон, А. Паран, Т. Юнг, Ж. Лагранж, А. Навье, С. Пуассон, Л. Коши, Б. Сен-Венан, Г. Ламе, Б. Клапейрон и другие. Среди русских ученых того времени можно отметить М.В. Остроградского, Д.И. Журавского, А.В. Гадолина, Х.С. Головина, В.Л. Кирпичева, А.Н. Динника и многие другие.

Ученые А. Треска, Б. Сен-Венаном, М. Леви, Э. Бельтрами, Р. Мизесом, М. Губером, Г. Генки, Л. Прандтль, Л. Надаи проделали огромную работу по развитию теории пластичности. Среди советских ученых в этой области широко распространены работы А. А. Ильюшина, А. А. Гвоздева, В. В. Соколовского, А. Ю. Ишлинского, Л. М. Качанова, Г. А. Смирнова-Аляева, А. Р. Ржаницына, Ю. Н. Работнова и многих других.

В 20 веке развитие получила теория ползучести. Данным явлением занимались А. Навье, Г.-Г. Кориолис, Л. Вика, В. Вебер, Э. Андраде, Ф. Нортон, Р. Бейли, Ф. Удквист, К. Содерберг, К. Дэвенпорт, П. Людвик, Ю.Н. Работнов, Л.М. Качанов, А.А. Ильюшин, А.Ю. Ишлинский, А.К. Малмейстер, А.Р. Ржаницын, М.И. Розовский и многие другие.

Нагруженность котлов вагонов-цистерн рассматривалась многими отечественными учёными: В.Н. Котуранов, Г.И. Богомаз, М.М. Болотин, В.Н. Филиппов, М.Н Овечников., Г.Ф. Чугунов и многие другие.

Несмотря на значительное количество исследований НДС котлов, влияние остаточных деформаций, возникающих при длительном действии гидростатической нагрузки, на поведение котлов железнодорожных цистерн не учитывалось в рассмотренных методах.

На данный момент для определения прочностных характеристик эффективно программное обеспечение (ПО), реализующее алгоритмы метода конечных элементов (МКЭ).

Цели и задачи исследования. Цель работы состоит в разработке методики определения НДС котла с учетом остаточных деформаций и моделирования пробоя оболочки цистерны.

Согласно поставленной цели сформированы следующие задачи:

- разработать модель ползучести;
- разработать методику определения НДС котла на основе созданной модели ползучести;
- сформулировать перечень практических рекомендаций для снижения остаточных деформаций в котле цистерны;
- разработать методику определения объема остающегося жидкого груза в котле цистерны;
- разработать методику моделирования процесса пробоя котла при внедрении чужеродного тела;
- определить рациональные геометрические характеристики броневой пластины, являющейся поверхностью опирания кронштейна;
- для рациональных вариантов формы пластины подобрать ее толщину и толщину котла;
- выполнить расчеты на основе разработанных методик.

Научная новизна. Разработана методика определения остаточных деформаций в котле цистерны. Проведен анализ зависимостей остаточных деформаций котла цистерны от различных факторов. Разработана методика определения объема остающегося жидкого груза в котле цистерны. Разработана методика определения НДС котла при пробое. Осуществлен выбор рациональных параметров и форм очертания броневой пластины, на основе компьютерного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Методики и алгоритмы расчета НДС котла можно использовать при конструировании новых вагонов цистерн. Предлагается перечень технических решений для уменьшения влияния остаточных деформаций на котел. Перечень основан на экспериментах с компьютерной моделью, практическая реализация позволит уменьшить объем остающегося груза при сливе. Результаты моделирования пробоя котла можно использовать при разработке защитных мер от разрушения котла при внедрении чужеродного тела.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи в данной работе решены с применением метода конечных элементов в перемещениях. Для учета процесса пластического деформирования в конструкции использована теория пластического течения. Принят критерий пластичности Губера-Мизеса. Для определения параметров кармана использована теория течения ползучести.

Задачи решались в компьютерных средствах моделирования FEMAP и ANSYS с построением конечно-элементных расчетных схем.

Положения, выносимые на защиту.

- расчетные схемы и методики для анализа НДС котла с учетом пластических свойств материала и ползучести;
- математическая модель ползучести материала;
- результаты исследований нагруженности котла вагона-цистерны при пробитии, полученные на основе предложенной методики;
- вариант броневой пластины с рациональной формой и геометрическими параметрами;
- результаты анализа влияния различных факторов на величину остаточных деформаций котла цистерны;
- методика определения объема оставшегося груза в кармане котла при сливе.

Степень достоверности работы обеспечена корректностью постановок задач. Задачи сформулированы и решены на основе общепринятых теоретических положений сопротивления материалов и механики деформируемого твердого тела. Подтверждена применением известных численных методов, реализованных в освидетельствованном ПО FEMAP и ANSYS. Подтверждена совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Вагоны и вагонные хозяйства» Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ)) в период с 2019 по 2023 г.; на международной научной конференции «Технические и естественные науки» в 2020 году; на

международной научной конференции «Наука. Исследования. Практика» в 2020 году; на международной научной конференции «MIP: Engineering-IV-2022: Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» в 2022 году; на заседании кафедры «Нетяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) в 2023 году.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Российского университета транспорта в дисциплине «Математическое моделирование вагонов» для студентов направления 23.05.03 Подвижной состав железных дорог. Результаты исследований могут быть использованы в НИИ, конструкторских бюро и других организациях, занимающихся разработкой цистерн для опасных грузов, в части обеспечения безопасности перевозок и экономической эффективности перевозок.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, содержащего 207 наименований, одного приложения. Общий объем составляет 157 страниц и включает 56 рисунков, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся обоснование актуальности темы диссертации и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приведен анализ методов исследования напряженно-деформированного состояния, применявшихся отечественными и зарубежными учеными. Раскрыта история развития механики деформируемого тела как научной дисциплины, указано влияние механики вагонов на развитие общей дисциплины. На основе анализа был сделан вывод об актуальности применения метода математического и компьютерного анализа при решении поставленных задач.

Сформулирована основная цель исследования: составление математической и компьютерной модели процесса деформирования котла железнодорожной цистерны и проведение экспериментов по численному моделированию. Для достижения поставленной цели принято решение об использовании метода конечных элементов, реализованного в программных комплексах FEMAP и ANSYS.

Во втором разделе проведено моделирование напряженно-деформированного состояния котла с учетом пластических свойств материала от удара пробойником. Приведена система уравнений, описывающая работу котла при нагружении с учетом пластических свойств материала.

Система уравнений представляет собой систему канонических уравнений теории упругости (1) и пластичности (2), (3).

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0, \\
 & \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0, \\
 & \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0, \\
 & \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \\
 & \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \\
 & \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\
 & \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \\
 & \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \\
 & \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}, \\
 & \sigma_x = 2G\varepsilon_x + \lambda e, \\
 & \sigma_y = 2G\varepsilon_y + \lambda e, \\
 & \sigma_z = 2G\varepsilon_z + \lambda e, \\
 & \tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \\
 & \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \\
 & \tau_{zx} = G\gamma_{zx}.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ – компоненты тензора напряжений;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xz}, \gamma_{zx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zy}$ – компоненты тензора деформаций;

X, Y, Z – проекции объемных сил на оси координат x, y, z ;

E – модуль упругости первого рода;

$G = E/2(1 + \nu)$ – модуль упругости второго рода;

e – объемная деформация;

λ – коэффициент Ляме;

ν – коэффициент Пуассона.

В качестве критерия пластичности принято условие Губера-Мизеса.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Для учета пластических свойств материала принят закон пластического течения:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} - [X(q)]^2 = 0, \quad (3)$$

где S_{ij} – компоненты девиатора напряжений;

$X(q)$ – функция меры упрочнения.

В качестве меры упрочнения принята работа пластической деформации.

$$q = A^p = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p, \quad (4)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

$d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненты тензора приращения пластических деформаций.

Сформирована расчетная схема, представляющая собой конечно-элементную модель, состоящую из шестигранных конечных элементов (КЭ) (рисунок 1).

Моделирование контактного взаимодействия реализовано с помощью контактных КЭ аппарата Connect программного комплекса FEMAP.

В расчетной схеме в зоне удара предусмотрено усиление в виде броневой пластины (рисунок 2).

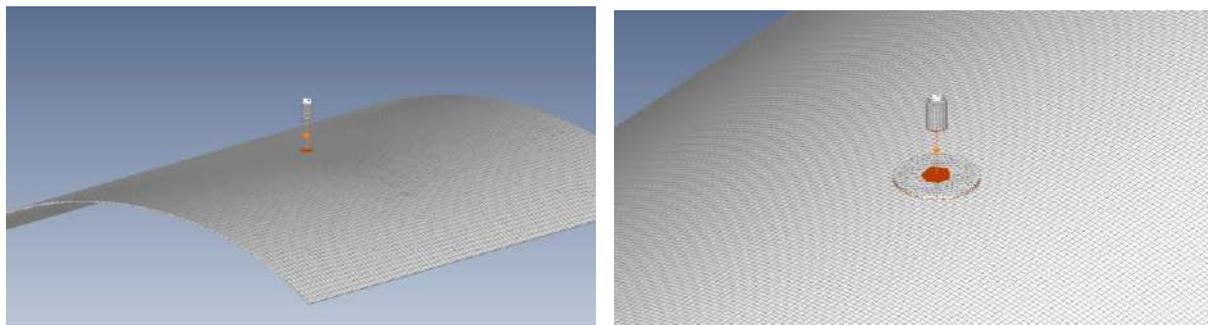
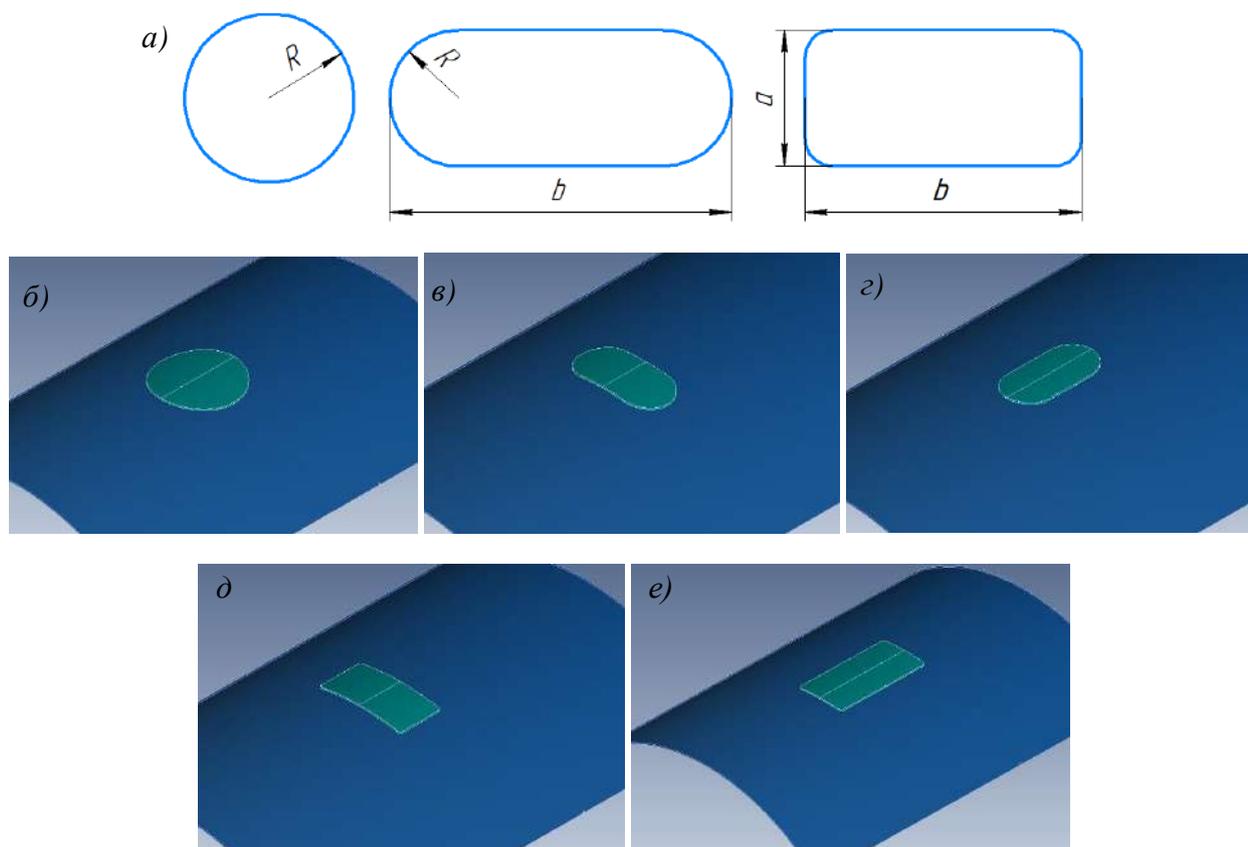


Рисунок 1 - Расчетная схема при расчете на пробой



а – геометрические параметры броневых пластин; б – круглая броневая пластина; в – овальная броневая пластина с поперечным расположением; г – овальная броневая пластина с продольным расположением; д – прямоугольная броневая пластина с поперечным расположением; е – прямоугольная броневая пластина с продольным расположением

Рисунок 2 – Броневой лист

При расчете приняты следующие допущения и исходные данные:

- толщина котла принимается 1, 1,1, 1,2, 1,3 см, переменность толщины не учитывалась;
- толщина броневой пластины принимается от 0,6 до 2 см с шагом 0,2 см;

- геометрические размеры броневой пластины варьируются: для круглой пластины – $R = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40$ см, для овальной пластины ($R \times b$ см) – $5 \times 20, 7,5 \times 30, 10 \times 40, 12,5 \times 50, 15 \times 60, 20 \times 80$, для прямоугольной пластины ($a \times b$ см) - $10 \times 20, 15 \times 30, 20 \times 40, 25 \times 50, 30 \times 60, 40 \times 80$;

- не учитывались сливной уклон, верхняя и нижняя горловины, шпангоуты, опоры, так как влияние на НДС в зоне удара перечисленных элементов незначительно;

- материал котла задан изотропным, характеристики материала соответствуют свойствам стали 09Г2С: модуль упругости $E = 200000$ МПа, предел текучести $\sigma_e = 345$ МПа, предел прочности $\sigma_{lim} = 490$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. Учтено свойство пластичности: принят критерий пластичности Губера-Мизеса.

- модуль упругости E материала котла при ударном действии пробойника не меняется;

- распределенная масса оболочки не учитывается.

В программном комплексе FEMAP пластичность материала задана графическим способом.

На каждый вариант броневой пластины сформирована расчетная схема и осуществлен расчет.

Ударный процесс смоделирован падением пробойника заданной массы с заданной высоты на оболочку котла. Ударная сила определяется по формуле:

$$F = \frac{S_{уд}}{\tau}, \quad (5)$$

где $S_{уд}$ – ударный импульс, действующий на пробойник;

τ – промежуток времени, в течение которого происходит удар.

Скорость удара рассчитана без учета скорости движения вагона. Скорость удара определяем в два этапа: на первом – моделируется опрокидывание вагона относительно точки контакта системы колесо-рельс на угол 90 градусов, на втором – рассматривается вагон без ходовых частей, определяя центр вращения в точке касания боковой грани рамы и горизонтальной поверхности. В

результате расчета получена скорость удара 1,835 м/с. Искомая скорость является исходной при моделировании пробоя котла вагона-цистерны, то есть принимается, что скорость, с которой пробойник перемещается к листу котла, равна 1,835 м/с.

Расчет системы уравнений (1), (3) осуществляется методом конечных элементов, базируемом на принципе стационарности интегральной величины. Интегральная величина представляет собой полную потенциальную энергии системы и зависит от работы напряжений и внешней нагрузки.

Система разрешающих уравнений МКЭ:

$$KU = P. \quad (6)$$

где K – матрица жесткости;

U – вектор узловых перемещений;

P – вектор узловых нагрузок.

Выражение (6) определяет систему алгебраических уравнений равновесия системы в перемещениях.

В третьем разделе предложена методика определения остаточных деформаций ползучести котла, возникающих в ходе эксплуатации вагона. Предложена методика определения объема оставшегося жидкого груза в карманах, возникающих при эксплуатации. Предложены решения для уменьшения остающегося объема груза в котле. Для описания процесса ползучести использована теория течения (7) и (8).

$$\xi_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\xi_i^c}{\sigma_i} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0), \quad (7)$$

где ξ_i^c – интенсивность скорости деформации ползучести;

σ_i – интенсивность напряжений;

δ_{ij} – символ Кронекера;

$\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$.

$$\sigma_i = \Phi(\xi_i^c, t), \quad (8)$$

где $\Phi(\xi_i^c, t)$ – некоторая функция интенсивности скоростей деформирования и времени.

Согласно (8), было сформировано уравнение ползучести, которое запрограммировано в программе ANSYS.

$$\xi^c = 2,4713 \cdot 10^{-30} \sigma^{3,2467} t^{0,5}, \quad (9)$$

где ξ^c – скорость деформации ползучести.

Расчетная схема представляет собой конечно-элементную схему котла с деревянными лежнями и центральными лапами (рисунок 3). Взаимодействие между телами осуществлено с помощью контактных конечных элементов TARGET170 и CONTA174.

При генерации конечно-элементной сетки использовались тетраэдральные конечные элементы. Нагрузка в расчетной схеме распределена по площади поверхностей лежней и лап. Приложенная распределенная сила равна силам реакции, возникающих в опорах (таблица 1). Каждый деревянный брусок крайнего опорного узла нагружается распределенной нагрузкой, равной 20625,5 Н. В центральном опорном узле каждый опорный лист нагружается распределенной нагрузкой, равной 23255,8 Н. На рисунке 4 представлены расчетные схемы технических решений по снижению остаточных деформаций котла.

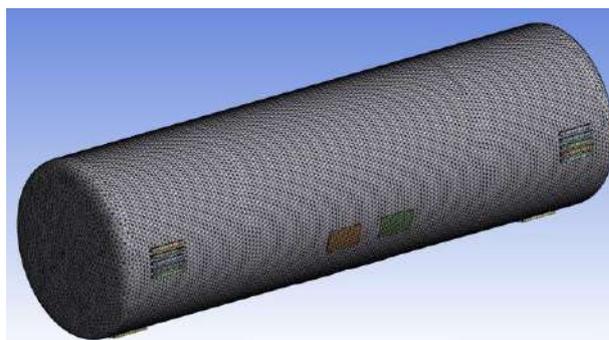
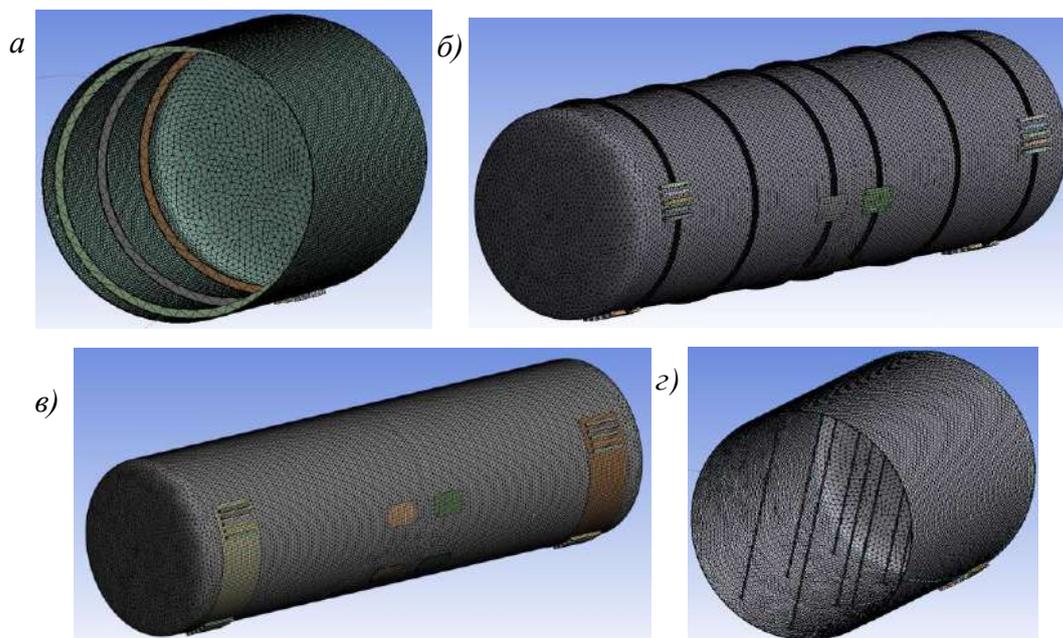


Рисунок 3 - Конечно-элементная модель котла для моделирования остаточных деформаций

Таблица 1 – Силы реакций опор

Тип опоры	Суммарная сила реакции, Н
Центральная опора	93023,01
Лежневые опоры	206254,74

На рисунках 4а и 4б изображены схемы котла, усиленного, соответственно, внутренними и разрезными внешними шпангоутами. На рисунке 4в изображена схема котла, опорные зоны которого усилены броневым листом. На рисунке 4г изображена схема котла, усиленного внутренними тягами. Определение эффективности рассматриваемых решений проводилось по значению объема образующегося кармана.



а – котел, усиленный внутренними шпангоутами; б – котел, усиленный внешними шпангоутами; в – котел, усиленный броневыми листами; г – котла, усиленный тягами

Рисунок 4 Расчетные схемы котла

В четвертом разделе были проведены серии экспериментов по компьютерному моделированию пробоя котла вагона цистерны дугами безопасности с учетом пластических свойств материала.

Сравнение вариантов и оценка их эффективности выполнена по максимальным деформациям в момент разрушения оболочки в зоне удара. Чем больше деформация в зоне удара в момент разрушения, тем больше кинетической энергии пробойника переходит в работу пластической деформации листа котла. Лист котла при этом не разрушается, а пластически деформируется. Момент разрушения наступает при величине напряжения, равной пределу прочности материала.

На первом этапе исследования проведена серия расчетов для различных форм броневой пластины и ее расположения на котле. Деформации позволяют судить о том, какая часть энергии удара перешла в работу пластической деформации, выражая способность конструкции пластически деформироваться, не разрушаясь. Можно выделить общую тенденцию увеличения деформации с увеличением площади пластины. Вмятина, образуемая в котле при ударе в вариантах с броневой пластиной, имеет конфигурацию, соответствующую форме и площади броневой пластины. Без усиления пластиной вмятина имеет

малую площадь, увеличивается контактное давление в зоне удара. Пробойник в случае без пластины проникает в оболочку как «иголка». Бронева пластина обеспечивает снижение давления от пробойника на лист котла при ударе. Тем самым увеличивается деформация котла до момента разрушения.

Увеличение толщины котла не оказало существенного положительного влияния на НДС котла. Деформация в вариантах без пластины в среднем составляет 0,4 см. Это в 7 раз меньше чем в вариантах с бронева пластиной.

Таким образом, среди вариантов с круглой бронева пластиной наибольшую деформацию имеет пластина радиусом 30 см – 2,446 см; среди прямоугольных, расположенных вдоль котла – пластина с размерами 10×20 см, деформация равна 1,622 см; среди прямоугольных, расположенных поперек – пластина 40×80, деформация равна 2,709 см; среди овальных, расположенных вдоль котла – пластина радиус 15 см и длиной 60 см, деформация равна 0,839 см; среди овальных, расположенных поперек – пластина радиус 20 см и длиной 80 см, деформация равна 2,711 см.

Для следующего этапа за основу для формирования расчетных схем взяты следующие варианты: круглая бронева пластина радиусом 30 см, круглая бронева пластина радиусом 40 см, прямоугольная бронева пластина 40×80 см, расположенная в радиальном направлении и овальная бронева пластина с радиусом скругления 20 см, длина 80 см, расположенная в радиальном направлении.

На следующем этапе исследования проведена серия расчетов с варьированием толщиной бронева пластины и толщиной листа котла. Толщина листа принималась в пределах от 1 до 1,3 см. Толщина бронева пластины принималась в диапазоне от 0,6 до 2 см. Оценка НДС котла осуществляется по максимальным пластическим деформациям в момент разрушения.

На основе результатов расчетов получены зависимости деформаций в зоне удара от толщины бронева пластины, приведенные на рисунке 5. Кривые деформаций с толщиной котла 1 см проходят выше, чем кривые вариантов с толщинами котла 1,1, 1,2, 1,3 см. Это означает, что увеличение толщины котла

не оказывает необходимого усиливающего эффекта. Расчет показал, что броневая пластина наиболее эффективна в вариантах с толщиной пластины от 1 до 1,8 см.

При сравнении кривых максимальная деформация у варианта с овальной броневой пластиной толщиной 1,4 см и толщиной стенок котла 1 см, деформация при этом составляет 3,573 см. Таким образом, вариант с овальной броневой пластиной толщиной 1,4 см и толщиной котла 1 см принят в качестве базового, так как при этом обеспечивается максимальная защита.

На заключительном этапе проведены расчеты на основе выбранного варианта. Для получения необходимых зависимостей варьировалась скорость удара при фиксированной массе пробойника. Результаты расчетов позволили получить зависимости, показанные на рисунке 6.

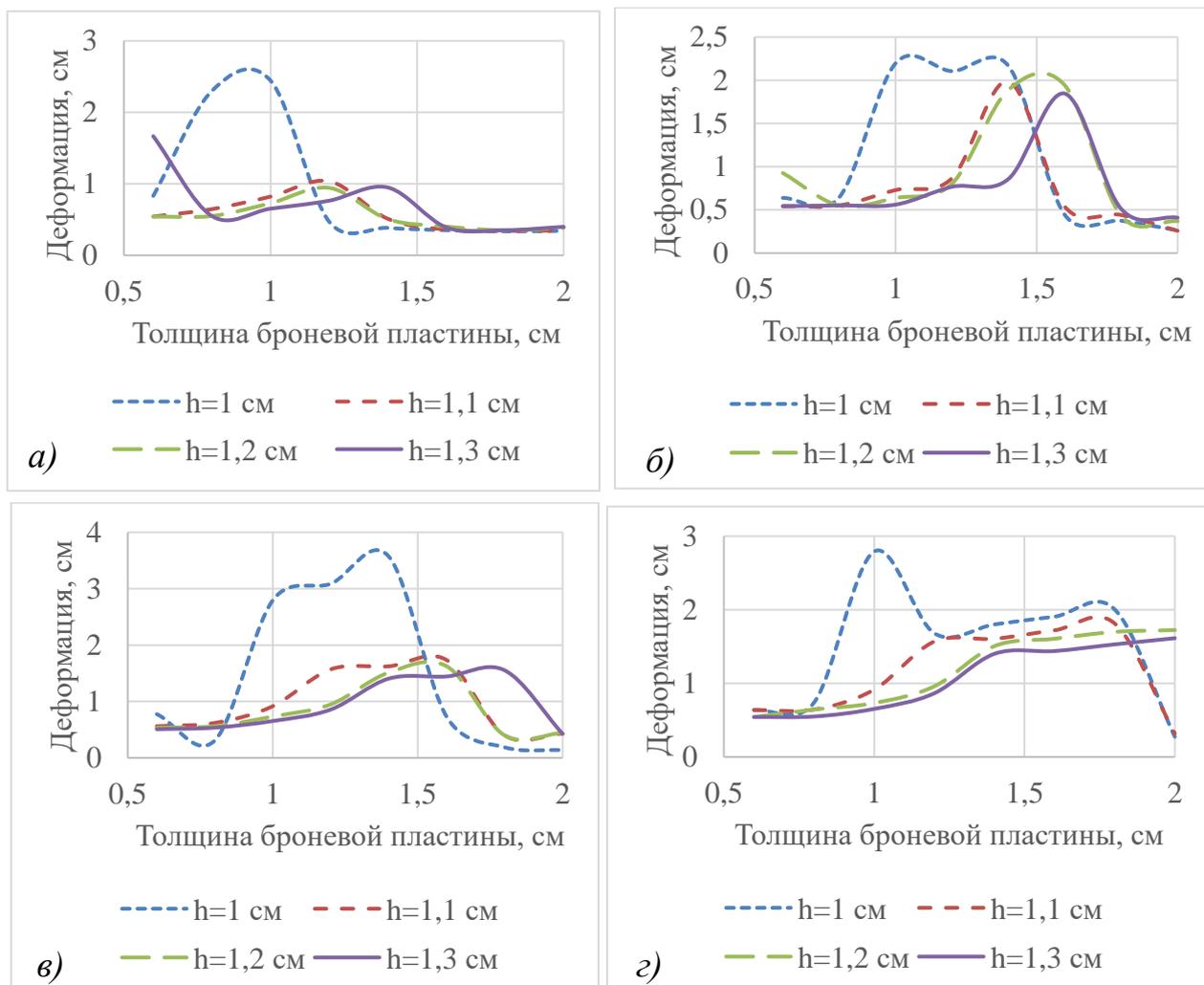
Энергия деформации в случае с пробойником массой 1,5 тонны резко возрастает при скоростях до 4 м/с, с пробойником массой 3 тонны энергия растет при скоростях до 2,5 м/с и для пробойника массой 5 тонн – до 2 м/с. После достижения указанных значений скорости зависимости сглаживаются. Это объясняется тем, что материалу при определенной скорости передается предельное значение энергии удара, при котором происходит разрушение и дальнейший рост невозможен.

Из графика зависимости напряжения от скорости удара на рисунке 6б видно ожидаемое увеличение напряжения в контактной зоне при увеличении массы и скорости пробойника.

Скорость удара при массе пробойника 1,5 тонны, при которой происходит разрушение оболочки, составляет 3,2 м/с.

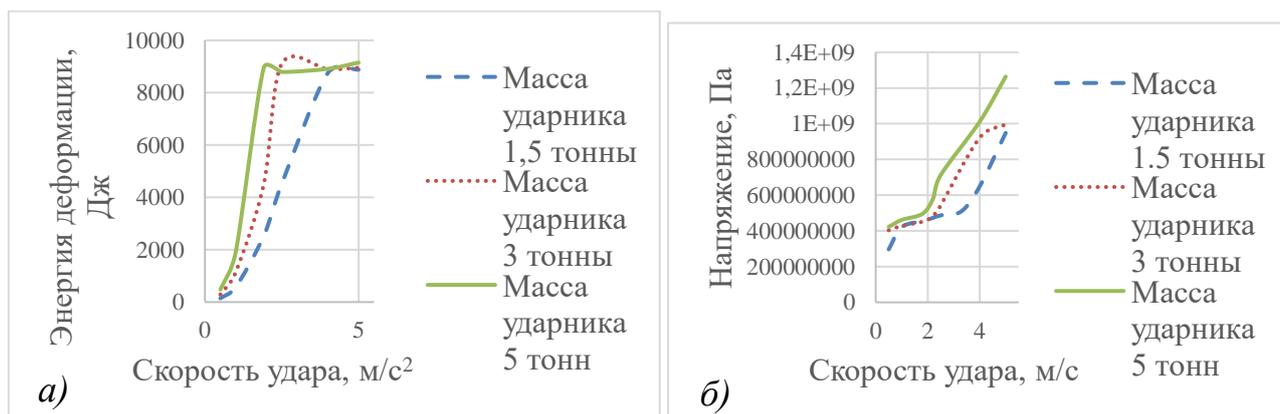
Скорость удара при массе пробойника 3 т, при которой происходит разрушение оболочки, составляет 2,3 м/с. Скорость удара при массе пробойника 5 т, при которой происходит разрушение оболочки, составляет 1,8 м/с.

Также в четвертом разделе были проведены серии экспериментов по компьютерному моделированию остаточных деформаций котла вагона цистерны при длительной эксплуатации с учетом ползучести материала.



а – круглая броневая пластина радиус 30 см; б – круглая броневая пластина радиус 40 см; в – овальная броневая пластина; г – прямоугольная броневая пластина

Рисунок 5 – Деформация в зоне удара при разрушении (h – толщина котла).



а – энергия деформации от скорости удара; б – напряжение от скорости удара

Рисунок 6 – Зависимости энергии деформации и максимального напряжения от скорости удара

Сравнение вариантов и оценка их эффективности выполнены по объемам оставшегося груза в карманах и деформациям в опорных зонах.

Скорость ползучести в начале эксплуатации вагона имеет наибольшее значение, это объясняется возникающими в котле максимальными

напряжениями. Показатель степени у напряжения в уравнении ползучести больше показателя у времени, поэтому в первые 10 лет работы вагона наибольшее влияние на процесс образования остаточных деформаций ползучести оказывает напряжение. При этом напряжение из-за релаксации постепенно уменьшается, а значение времени, напротив, растет, оказывая влияние на скорость ползучести и, соответственно, на величину деформаций.

Максимальные деформации образуются в зонах опор, что объясняет образование усталостных трещин в этих зонах. В таблице 2 отображены максимальные значения деформаций в опорных зонах.

Все рассмотренные варианты предложений по уменьшению остаточных деформаций эффективны, при сравнении с базовым вариантом без усилений. Наиболее эффективными решениями являются: усиление котла шпангоутами, увеличение толщины котла, усиление котла броневым листом толщиной 1,4 см в области лежней и усиление котла тремя внутренними тягами.

Таблица 2 – Величина деформации в опорных зонах

Вариант	Деформация в области лежневых опор по дну котла, см	Максимальная деформация в области лежневых опор, см	Максимальная деформация в области центральных опор, см
Толщина листа котла 1 см (базовый)	4,03	9,29	9,72
Котел с внутренними шпангоутами	0,23	0,38	0,56
Котел с внешними шпангоутами	0,27	0,51	0,29
Толщина листа котла 1,1 см	2,95	7,95	6,81
Толщина листа котла 1,2 см	2,31	6,66	5,41
Толщина листа котла 1,3 см	1,94	5,51	4,28
Толщина листа котла 1,5 см	1,11	3,58	2,62
Котел с броневым листом толщиной 0,6 см	1,53	3,59	7,47
Котел с броневым листом толщиной 0,8 см	1,64	3,82	7,58
Котел с броневым листом толщиной 1,4 см	0,93	2,88	7,15
Котел с броневым листом толщиной 2 см	0,63	2,39	6,98
Котел с броневым листом толщиной 3 см	0,18	1,61	6,86
Котел с тремя внутренними тягами	1,96	4,11	2,58
Котел с внутренними тягами накрест	1,24	3,72	5,95
Котел с одной внутренней тягой	2,65	7,66	5,68

На рисунке 7 приведена обобщающая гистограмма, наглядно показывающая эффективность рассмотренных решений по снижению остаточных деформаций в котле.

Оптимальная толщина броневых листов варьируется от 0,6 до 1,4 см, что позволяет уменьшить объем кармана в 2,2 раза. Дальнейшее увеличение толщины броневых листов не вносит существенного влияния на уменьшение объема кармана.

Увеличение толщины котла до 1,3 см оказало существенный эффект на величину объема, уменьшив его в 3,8 раза. Дальнейшее увеличение толщины котла является не эффективным. Уменьшение объема кармана объясняется увеличением жесткости и прочности котла при увеличении толщины листов котла.

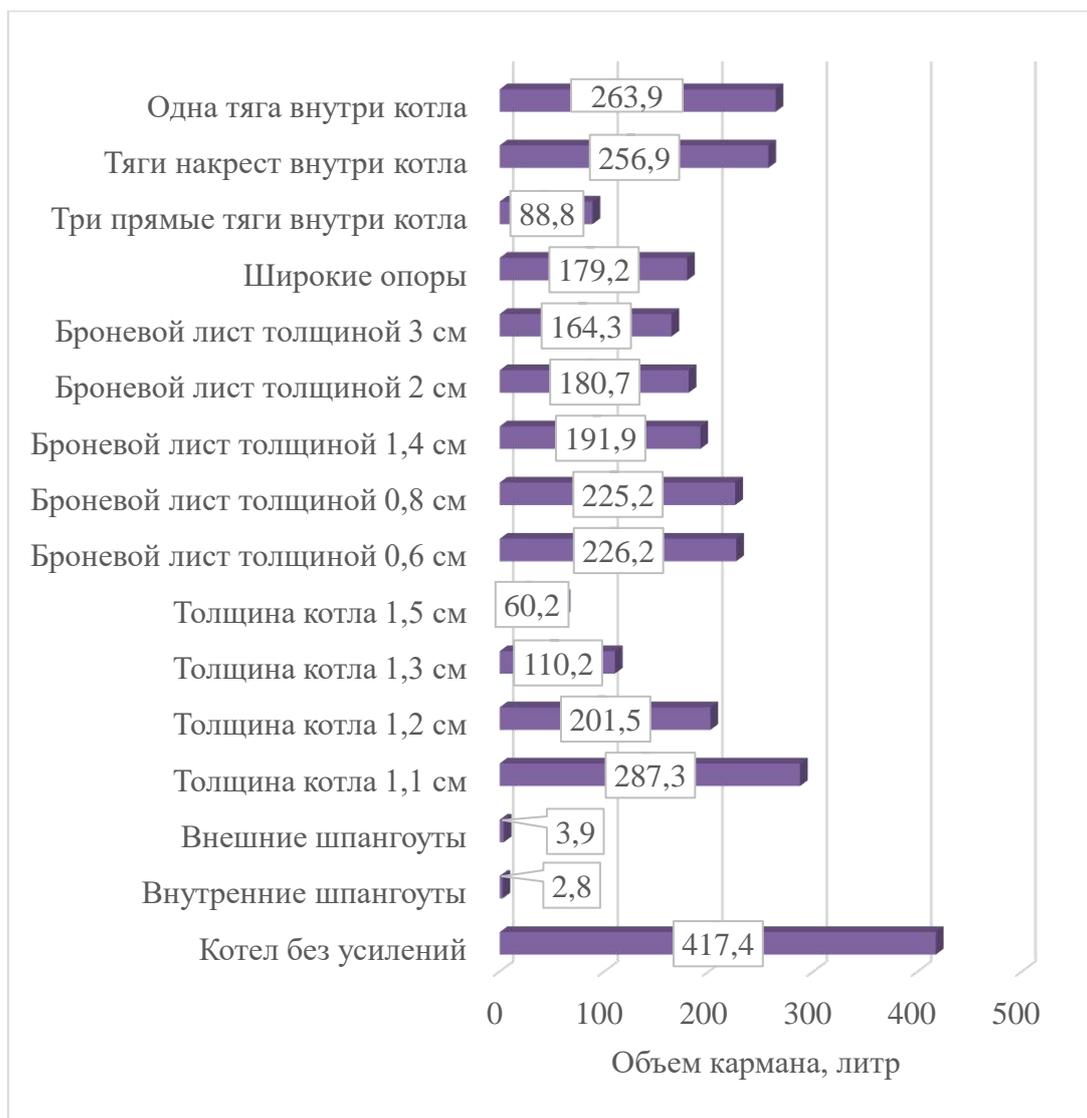


Рисунок 7 – Объем оставшегося груза в кармане

Объем кармана в варианте с тягами внутри котла уменьшился в 4,7 раза. Применение шпангоутов для увеличения прочности котла позволило уменьшить объем кармана с 417 литра до 2,8 литра.

Лучший результат показали варианты с усилением котла шпангоутами. Кроме того, эффективны увеличение толщины котла, установка броневых листов в зоне лежней и монтаж тяг внутри котла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы.

1 Сформированы математические модели котла цистерны под действием локальных воздействий с учетом нелинейных свойств материала. В силу сложности и значительной трудоемкости разрешающих систем уравнений, были применены САЕ-системы для проведения расчетов. Применение программ с запрограммированным алгоритмом МКЭ является эффективным способом решения поставленных задач.

2 Рассчитана скорость удара при опрокидывании вагона-цистерны, скорость составила 1,835 м/с. Рассчитанная скорость рекомендуется для использования при моделировании пробоя котла железнодорожной цистерны чужеродным телом.

3 Предложена методика определения НДС котла при ударе с учетом пластических свойств материала. Проведена серия расчетов на пробой котла и получены следующие результаты:

- обосновано применение броневой пластины для защиты котла от пробоя. Разрушение в зоне удара в варианте с котлом с толщиной листа 1 см, не усиленным броневой пластиной, происходит раньше и с меньшей пластической деформацией чем в варианте с котлом, усиленным броневой пластиной. В котле в зоне удара дугой безопасности без локального усиления возникают меньшие пластические деформации, вследствие этого меньшая часть кинетической

энергии пробойника преобразуется в работу пластической деформации. Поэтому котел, не укрепленный броневой пластиной, обеспечен меньшей защитой;

- определено влияние толщины котла на прочность. Увеличение толщины котла не оказывает необходимого усиливающего эффекта;

- рассмотрено влияние формы и размеров броневой пластины на НДС котла вагона-цистерны. Форма броневой пластины влияет на локализацию критических напряжений, но на прочность конструкции влияния не обнаружено. Расположение броневой пластины на оболочке и ее размер, напротив, влияет на величину деформаций – варианты с большей площадью соприкосновения с оболочкой и расположенной поперек котла показывают лучшие результаты. Деформация в варианте с круглой броневой пластиной радиусом 30 см составляет 2,446 см, деформация в варианте с прямоугольной броневой пластиной 40×80 см составила 2,709 см, деформация в варианте с овальной броневой пластиной составила 2,711 см;

- броневая пластина эффективно увеличивает прочность котла в зоне удара. Лучшие результаты показал котел толщиной 1 см и овальной броневой пластиной, расположенной вдоль образующей котла, радиус скругления 20 см, длинна 80 см, толщина 1,4 см. Деформация в зоне удара составила 3,573 см. Данная броневая пластина рекомендуется в качестве меры для реализации защиты от разрушения котла вагона-цистерны в месте крепления дуг безопасности.

4 Предложена методика определения объема кармана котла. Методика рекомендуется для использования при оценке экономической эффективности вагона-цистерны. Объем оставшегося груза после слива в кармане котла при эксплуатации вагона продолжительностью 40 лет составляет 417,4 литра.

5 Предложена методика определения остаточных деформаций в котле железнодорожной цистерны. Методика рекомендуется для оценки НДС котлов железнодорожных цистерн с учетом ползучести материала при длительном воздействии гидростатической нагрузки. Проведены расчеты на основе предложенной методики и получены следующие результаты:

- зафиксировано уменьшение остаточных деформаций за счет возрастания прочности и жёсткости конструкции при увеличении толщины оболочки, применении броневых листов в боковых опорных зонах, усилении шпангоутами или монтаже внутренних тяг;

- увеличение толщины котла до 1,3 см уменьшает объем оставшегося груза (объем кармана) до 110,2 литра;

- применение броневых листов в зоне лежней позволит уменьшить объем кармана до 191,9 литра, что является менее эффективным чем увеличение толщины листов котла, но при этом более технологичным;

- применение тяг уменьшает объем кармана до 88,8 литра, но данное решение является трудоемким и технологически не эффективным;

- усиление котла внутренними шпангоутами является самым эффективным решением из рассмотренных, позволяющая уменьшить объем кармана до 2,8 литра;

- усиление котла внешними разрезными шпангоутами уменьшает объем котла до 3,9 литра, при этом данный способ является более технологичным чем применение внутренних шпангоутов.

6 Предложены конструктивные решения для уменьшения остаточных деформаций котла. Рекомендуется укреплять котлы железнодорожных цистерн внешними разрезными шпангоутами и устанавливать броневые листы между котлом и ложементом в крайних опорных узлах.

7 Направление дальнейшего развития исследования может состоять в следующем:

- проведение исследований, направленных на улучшение физических свойств сплавов, используемых для создания листов котла, или же направленных на поиск принципиально новых материалов;

- проведение исследований НДС котлов с измененной формой;

- разработка новых типов опорных узлов;

- проведение испытаний предложенной модели защиты котла вагона-цистерны от удара;

- проведение испытаний котла вагона-цистерны со шпангоутами и с крайними ложементными зонами, усиленными броневым листом, с определением статического НДС в опорных зонах;

- предложенную методику моделирования пробоя котла вагона-цистерны можно сделать более точной, учтя силу трения в контактных зонах. Кроме того, можно дополнительно рассмотреть модели аварийных ситуаций, в которых происходит разрез котла объектом инфраструктуры железнодорожных путей;

- также для более полной картины и точной оценки скорости движения пробойника при контакте с котлом целесообразно провести расчет с учетом скорости вагона, набранной при движении в составе поезда;

- предложенную методику моделирования остаточных деформаций можно сделать более точной, если учесть колебания жидкости внутри котла при движении. Также для более качественной оценки влияния гидростатической нагрузки на НДС котла целесообразно провести дополнительные экспериментальные исследования по определению деформаций в опорных зонах котла с определением сил давления жидкости на дно и стенки котла.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 **Сурнин, А.Ю.** К вопросу о моделировании разрушения котла железнодорожной цистерны дугами безопасности при опрокидывании / А.Ю. Сурнин, С.В. Беспалько. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2022. – № 4 (75). – С. 21- 27.

2 **Сурнин, А.Ю.** Моделирование пробоя котла вагона-цистерны дугами безопасности с учетом пластичности материала / А.Ю. Сурнин, С.В. Беспалько. – Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 8 (20). – С. 26 – 34.

3 **Сурнин, А.Ю.** Моделирование остаточных деформаций котла вагона-цистерны на основе теории ползучести / А. Ю. Сурнин, С. В. Беспалько. – Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 7 (19). – С. 66 – 76.

б) в других изданиях и материалах конференций:

4 **Сурнин, А.Ю.** Применение вариационного метода и метода конечных элементов для определения статической нагруженности котла железнодорожной цистерны / А. Ю. Сурнин, С. В. Беспалько, Н. А. Корниенко. – Текст : непосредственный // Технические и естественные науки : сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции. – 2020. – December 2020, special issue. – С. 61 – 69.

5 **Сурнин, А.Ю.** Применение метода конечных элементов для определения статической нагруженности котла железнодорожной цистерны / А.Ю. Сурнин, С. В. Беспалько, Н. А. Корниенко, Л. В. Колокольчикова.– Текст : непосредственный // Наука. Исследования. Практика : сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции. – 2020. – December 2020, special issue. – С. 126 - 128.

Сурнин Артем Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОТЛА ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНЫХ НАГРУЗОК

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2024 г.

Формат бумаги 60×90¹/16

Объем усл.п.л – 1,5

Тираж 80 экз.

Заказ № _____ от _____

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9