

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 614.846.63:004.94(043.3)

КОРОТКЕВИЧ
Сергей Геннадьевич

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИСТЕРН ПРЯМОУГОЛЬНОГО
СЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.02 – машиноведение, системы приводов и детали машин

Минск, 2022

Работа выполнена в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Научный руководитель

КОВТУН Вадим Анатольевич,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оперативно-тактической деятельности и техники ГУО «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Официальные оппоненты:

ШИМАНОВСКИЙ Александр Олегович,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика» УО «Белорусский государственный университет транспорта»;

ЕЛОВОЙ Олег Михайлович,

кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе и инновационной деятельности ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация

УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого»

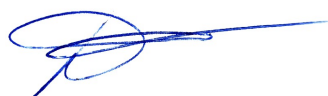
Защита состоится «16» декабря 2022 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202; телефон ученого секретаря (+375 17) 331-30-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «08» ноября 2022 г.

Ученый секретарь совета

по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор



О. Г. Девойно

© Короткевич С. Г., 2022

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь ежегодно происходит более 5 тыс. пожаров, на которых погибает более 500 человек, при этом прямой материальный ущерб составляет порядка 34 млн бел. руб. Одним из определяющих факторов в борьбе с пожарами является своевременное прибытие аварийно-спасательных подразделений Министерства по чрезвычайным ситуациям (МЧС), которое во многом зависит от наличия современной и надежной техники. К основным транспортным средствам специального назначения относятся пожарные автоцистерны, количество которых в подразделениях МЧС в 2021 году составило 2027 единиц, из них 61,8 % смонтированы на шасси Минского автомобильного завода (МАЗ).

Согласно статистике, более 60 % от всех пожаров в нашей стране происходит в сельской местности, а также в природных экосистемах, что вызывает необходимость осуществлять движение пожарных автоцистерн по проселочным дорогам, а также в условиях бездорожья. Кроме того, ежедневное следование пожарных автомобилей (ПА) к месту возникновения чрезвычайных ситуаций происходит в режимах «ускорение», «торможение», «поворот». При таких условиях конструкции цистерн испытывают значительные нагрузки, передаваемые через раму шасси и от перевозимой жидкости. Проведенный анализ показал, что общее количество ремонтируемых цистерн ПА в год по причине нарушения герметичности конструкции составляет порядка 85–100 единиц, что значительно снижает боевую готовность подразделений МЧС, при этом материальные затраты превышают 200 тыс. бел. руб.

Современные цистерны ПА имеют форму тонкостенных оболочечных конструкций прямоугольного сечения. Анализ исследований, посвященных проектированию цистерн, показал, что большинство работ направлено на повышение устойчивости автоцистерн при движении, а также снижение гидродинамической нагруженности их конструкций от колебаний жидкости. Однако существующие методики расчета не позволяют исследовать характер формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций цистерн при различных режимах движения пожарных автомобилей, а также влияние геометрических параметров конструктивных элементов на уровень возникающих напряжений в наиболее ответственных узлах, что является важной научной и технической задачей. Разработка подходов по выбору рациональных параметров элементов, повышающих прочность конструкций цистерн, обеспечит их длительный межремонтный период и повысит конкурентоспособность разрабатываемых в настоящее время автомобильных цистерн. Таким образом, работа посвящена расчету и проектированию цистерн прямоугольного сечения повышенной прочности ПА.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07 мая 2020 г. № 156, п. 4.1, 6.2 и 6.6). Отдельные этапы данной работы проводились в рамках договора с БРФФИ от 30 июня 2018 г. № Т18-008, № ГР 20181225, 2018–2020 гг.; НИР Университета гражданской защиты МЧС Беларуси (№ регистрации 17-09 от 02 января 2017 г., 17-20 от 01 сентября 2017 г. и 21-21 от 01.09.2021 г.).

Цель и задачи исследования

Целью работы является расчет и проектирование цистерн прямоугольного сечения повышенной прочности пожарных автомобилей с учетом особенностей их эксплуатационной нагруженности.

Для достижения поставленной *цели* необходимо решить следующие *задачи*:

- *провести анализ* современных конструкций цистерн ПА, условий их эксплуатации и технического состояния;
- *разработать* методику моделирования напряженного состояния цистерн прямоугольного сечения ПА, учитывающую влияние эксплуатационных нагрузок на характер формирования и распределения полей напряжений в конструкциях;
- *разработать* 3D конечно-элементные модели цистерн, которые адаптированы к режимам, характеризующим особенности движения ПА, и позволяют исследовать распределение и уровень напряжений в конструкциях, прогнозировать места вероятного их разрушения, а также обосновывать внесение конструкционных изменений;
- *исследовать* влияние режимов движения ПА, типа, размеров и расположения элементов, повышающих прочность цистерн, на уровень напряжений в наиболее нагруженных узлах конструкций;
- *разработать и внедрить* в аварийно-спасательные подразделения МЧС модернизированные цистерны ПА, обладающие повышенным запасом прочности их конструкций и увеличенным межремонтным периодом.

Научная новизна

Разработана методика моделирования напряженного состояния конструкций цистерн прямоугольного сечения пожарных автомобилей, *учитывающая* эксплуатационные нагрузки, зависящие от параметров и условий, характеризующих особенности режимов движения пожарных автомобилей, а также экспериментально установленных максимальных значений ускорения, возникающего под действием инерционных нагрузок в конструкциях, достоверность которой подтверждена экспериментально (отличие не более 8 %), *позволяющая* на основе 3D конечно-

элементных моделей прогнозировать характер формирования и распределения полей напряжений в конструкциях цистерн, а также места вероятного их разрушения.

Установлены закономерности, которые комплексно *связывают* параметры (скорость, ускорение, торможение, поворот) и условия (вид дорожного покрытия), характеризующие особенности режимов движения пожарных автомобилей, а также тип, размеры и расположение элементов, повышающих прочность цистерн, с уровнем и характером распределения полей напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах их конструкций: в угловых и тавровых соединениях элементов.

Обоснован выбор рациональных геометрических параметров элементов, повышающих прочность цистерн прямоугольного сечения (косынки, ребра жесткости на стенках, поперечные усиления на дне), применение которых *позволило* разработать рекомендации по конструированию цистерн объемом 5, 8 и 10 м³ с повышенным в 1,2–1,6 раза запасом прочности пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317 и обеспечить увеличенный межремонтный период эксплуатации данных конструкций не менее чем в 1,5–2 раза.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика моделирования напряженного состояния конструкций цистерн прямоугольного сечения пожарных автомобилей, основанная на разработанных конечно-элементных моделях, *отличающаяся* учетом параметров и условий, характеризующих особенности режимов движения пожарных автомобилей, а также экспериментально установленных максимальных значений ускорения, возникающего под действием инерционных нагрузок в конструкциях, *позволившая* прогнозировать при их эксплуатации характер формирования и распределения полей напряжений.

2. Экспериментальные зависимости, *связывающие* параметры (скорость, ускорение, торможение, поворот) и условия (вид дорожного покрытия), характеризующие особенности режимов движения пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317, со значениями ускорения ($a = 7,4–25,2 \text{ м/с}^2$), возникающего под действием инерционных нагрузок в конструкциях цистерн объемом 5, 8 и 10 м³, использование которых при конечно-элементном моделировании *позволило* установить уровень нагруженности конструкций.

3. Конечно-элементные 3D модели конструкций цистерн прямоугольного сечения пожарных автомобилей, *отличающиеся* учетом инерционных нагрузок, гидравлического давления, физико-механических характеристик, геометрических параметров, использование которых *позволило* исследовать напряженное состояние конструкций цистерн, проектировать по критериям нагруженности и прочности отдельные их элементы и установить наиболее нагруженные узлы.

4. Установленные закономерности, *связывающие* уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах, с режимами движения пожарных автомобилей, а также типом, размерами и расположением элементов,

повышающих прочность цистерн (косынки, ребра жесткости на стенках, поперечные усиления на дне), *позволившие* разработать модернизированные конструкции цистерн объемом 5, 8 и 10 м³ с повышенным в 1,2–1,6 раза запасом прочности по сравнению с серийными.

5. Экспериментальные зависимости, *связывающие* параметры (скорость, ускорение, торможение, поворот) и условия (вид дорожного покрытия), характеризующие особенности режимов движения пожарных автомобилей, с повторно-переменными напряжениями, возникающими в конструкциях цистерн прямоугольного сечения, *позволившие* установить, что достигнуто снижение их уровня в областях угловых соединений передней и боковой стенок на 30–32 %, а также передней стенки и дна на 13–15 % в модернизированных конструкциях по сравнению с серийными.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Научный руководитель соискателя д-р техн. наук, профессор В. А. Ковтун участвовал в определении цели и задач исследований, в обсуждении их результатов, в написании статей и заявок на патенты.

Соавторы научных публикаций, результаты которых вошли в диссертацию, принимали участие в выборе методик и обсуждении результатов исследований (чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор Ю. М. Плескачевский, канд. техн. наук И. Тодоров, канд. техн. наук, доцент В. А. Лодня, А. Н. Вырский, И. А. Баран, В. А. Жаранов), а также при проведении экспериментальных исследований (канд. техн. наук, доцент В. Н. Пасовец).

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Включенные в диссертационную работу результаты представлены и обсуждены на Международной научно-практической конференции (МНПК) «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации» (г. Гомель, 2016); XXIX МНПК, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России (г. Москва, 2017); МНПК «Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019–2030 годы» (г. Минск, 2018); IX–X Всероссийских научно-практических конференциях «Надежность и долговечность машин и механизмов» (г. Иваново, 2018); International conference «NDT DAYS» (Sozopol, 2019); ярмарке инновационных разработок «Промышленность: от инновации до производства» (г. Минск, 2019); XI МНПК «Проблемы безопасности на транспорте» (г. Гомель, 2021); XII–XVI МНПК «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Минск, 2018–2022).

Разработанная соискателем методика прошла производственную апробацию и принята к внедрению на предприятиях ООО «ПОЖСНАБ» при проектировании новых цистерн повышенной прочности пожарных автомобилей на шасси МАЗ-6317 и ОАО «Гомсельмаш» при разработке опор крепления и корпусов

конструкций баков энергосредств УЭС-2-250А, УЭС-2-280А, УЭС-250, применяемых в сельскохозяйственных машинах. Также производственно-техническим центром учреждения «Гомельское областное управление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» (при непосредственном участии автора) в соответствии с разработанными рекомендациями по конструированию для увеличения межремонтного периода эксплуатации пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5317 проведены работы по модернизации серийных цистерн объемом 5 м³.

За установление особенностей влияния эксплуатационных нагрузок на напряженно-деформированное состояние конструкций цистерн пожарных автомобилей, что позволило разработать новые элементы цистерн и модернизировать эксплуатируемые конструкции, обеспечив повышение их запаса прочности и увеличение межремонтного периода по сравнению с серийно выпускаемыми отечественными аналогами, соискателю назначена стипендия Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым на 2020 год (распоряжение Президента Республики Беларусь от 09 декабря 2019 г. № 233рп).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 27 печатных работах, в том числе 13 статьях в изданиях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (7,4 авторских листа), из которых 2 за рубежом; 5 статьях в сборниках конференций; 9 материалах докладов на международных конференциях. Получено 2 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 251 страница, включая 29 таблиц и 109 рисунков на 60 страницах, список использованных источников из 185 наименований и 14 приложений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе на основании нормативной документации, патентно-информационных, литературных и интернет-источников исследованы различные концептуальные подходы к созданию и особенностям эксплуатации пожарной аварийно-спасательной техники в Республике Беларусь, Российской Федерации, а также странах Америки и Европейского союза.

Анализ ПА, привлекаемых на ликвидацию чрезвычайных ситуаций в Республике Беларусь за период с 2016 по 2021 год, позволил установить, что более 80 % выездов осуществляет пожарная автоцистерна. Практика показывает, что одной из основных причин проводимых ремонтов ПА является нарушение герметичности цистерны.

В Республике Беларусь и за рубежом решением проблем проектирования и обеспечения эксплуатационной надежности деталей и узлов машин, в том числе для перевозки жидких грузов, занимались ученые: М. С. Высоцкий, А. П. Ласковнѐв, А. О. Шимановский, Ю. М. Плескачевский, М. Д. Безбородько, И. В. Качанов, В. К. Шелег, А. В. Путято, Б. Л. Кулаковский, А. Т. Скойбеда, С. В. Беспалько, О. М. Еловой, В. Б. Альгин, F. Fleissner, G. Lin, A. Kolaei, Y. Chen, Т. Г. Елизарова, С. А. Бочкарѐв и др. Работы посвящены повышению эксплуатационных характеристик деталей машин и моделированию нагруженности цистерн автомобильного и железнодорожного транспорта. Проведенный анализ показал, что весьма мало исследований посвящено влиянию режимов движения автомобилей на напряженное состояние цистерн прямоугольного сечения и их запас прочности.

В качестве объекта исследований выбраны наиболее распространенные модели цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, а также 8 и 10 м³ на шасси МАЗ-6317. Сформулированы цели и задачи диссертационных исследований.

Вторая глава посвящена разработке методики моделирования напряженного состояния цистерн прямоугольного сечения ПА, а также выбору методов и оборудования для проведения теоретических и экспериментальных исследований. Для оценки напряженного состояния цистерн ПА предложена новая расчетная методика, которая основана на двухэтапном подходе, включающем экспериментальное установление максимальных значений ускорения, возникающего в конструкциях под действием инерционных нагрузок, и разработку адаптированных к режимам движения ПА 3D конечно-элементных моделей (рисунок 1).

Для проведения исследований определены параметры и условия, характеризующие особенности режимов движения ПА к месту возникновения чрезвычайных ситуаций: режим № 1 – движение по прямому участку асфальтированной дороги со скоростью 50 ± 2 км/ч; режим № 2 – движение по грунтовой дороге категории VI-б с допустимой скоростью 20–30 км/ч; режим № 3 – движение по прямому участку асфальтированной дороги со скоростью 50 ± 2 км/ч с последующим замедлением двигателем до скорости 10–15 км/ч для вхождения в левый поворот на 90°; режим № 4 – ускорение с места по прямому участку асфальтированной дороги до скорости 30 ± 2 км/ч и экстренное торможение до полной остановки. Эксперименты в каждом режиме движения ПА проводились с повторением по 3 раза. Длина испытательных участков для режима № 1 составляла 850–900 м; для режима № 2 – 480–500 м; для режима № 3 – 280–300 м; для режима № 4 – 100–110 м.



Рисунок 1. – Блок-схема методики моделирования напряженного состояния конструкций цистерн прямоугольного сечения ПА

Моделирование напряженного состояния цистерн, возникающего при различных эксплуатационных режимах движения ПА, проводилось в программном комплексе ANSYS. При разработке конечно-элементных 3D моделей цистерн использованы элементы категории SHELL, а в качестве формы элемента дискретизации принят гексаэдр (метод Hex Dominant). Для связи элементов компьютерной модели использовался связанный (Bonded) контакт. Контактная задача решалась методом Лагранжа. Программные настройки учитывают физико-механические характеристики используемых материалов. В качестве ограничения принято жесткое закрепление 3D моделей цистерн в нижней части лонжеронов ПА. Для каждого режима движения ПА заданы гидравлическое давление на стенки цистерны с учетом вектора действующей силы (по осям XYZ) и плотности жидкости, а также установленное экспериментально максимальное значение ускорения, возникающего под действием инерционных нагрузок в конструкции.

При решении задачи определения напряженного состояния упруго деформированного тела методом конечно-элементного моделирования применены математические выражения, которые основаны на методе равновесия с использованием принципа Даламбера. В этом случае добавляются узловые силы, эквивалентные

массовым силам инерции, которые зависят от максимальных значений возникающего ускорения. Для математического описания нагружения цистерны ПА применена система дифференциальных уравнений движения в частных производных для девяти компонентов тензора напряжений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho F_x &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho F_y &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho F_z &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2},\end{aligned}\quad (1)$$

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

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

F_x, F_y, F_z – проекции вектора внешних объемных (массовых) сил, Н/кг;

u_x, u_y, u_z – проекции вектора перемещения выделенного элемента на координатные оси x, y, z соответственно, м.

В результате расчета получены картины распределения полей эквивалентных напряжений по Мизесу, наибольших главных, нормальных и касательных напряжений. Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{э.кв.}}$ (МПа) определялись по формуле:

$$\sigma_{\text{э.кв.}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (2)$$

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

Подтверждение эффективности разработанной расчетной методики проводилось с использованием тензометрического комплекса путем установки измерительных тензорезистивных датчиков. При этом главные нормальные напряжения σ_1, σ_2 (МПа) определялись по показаниям значений возникающих деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ (м):

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1), \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, ГПа;

μ – коэффициент Пуассона;

$\sigma_1 = \sigma_{\text{max}}, \sigma_2 = \sigma_{\text{min}}$.

Техническая диагностика состояния цистерн ПА в процессе эксплуатации осуществлялась при помощи визуального метода неразрушающего контроля.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, в том числе с применением компьютерного моделирования, влияния действующих эксплуатационных нагрузок в исследуемых режимах движения ПА на напряженное состояние и запас прочности цистерн. Исследования максимальных значений ускорения, возникающего в конструкциях цистерн ПА под действием инерционных нагрузок, проведены при помощи измерительного комплекса «Ларсон Дэвис 2900» и акселерометров типа 352С18 (таблица 1). Места установки датчиков в горизонтальных и вертикальных плоскостях конструкций определялись путем проведения замеров на равноудаленное расстояние от сварных швов и иных конструкционных элементов, а также с учетом моделей их гидравлического нагружения.

Таблица 1. – Максимальные значения ускорения a_{max} (м/с²), зафиксированные в конструкциях цистерн во время испытаний ПА

Режим движения ПА	Объем цистерны и модель шасси ПА		
	5 м ³ на шасси МАЗ-5337	8 м ³ на шасси МАЗ-6317	10 м ³ на шасси МАЗ-6317
№ 1	7,4 ± 0,7	9,2 ± 0,8	10,8 ± 0,9
№ 2	22,3 ± 1,7	24,6 ± 1,8	25,2 ± 1,9
№ 3	17,9 ± 1,4	18,1 ± 1,5	19,4 ± 1,5
№ 4	15,8 ± 1,2	22,7 ± 1,7	22,9 ± 1,8

В результате проведенных исследований установлено, что при движении ПА по грунтовым дорогам категории VI-б с допустимой скоростью 20–30 км/ч (режим № 2) зафиксированы наибольшие значения ускорения, которые составили от 22,3 до 25,2 м/с². Полученные результаты свидетельствуют о том, что величина инерционных нагрузок, возникающих в конструкциях цистерн ПА, в значительной мере зависит от режимов движения.

Создание 3D моделей цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, а также 8 и 10 м³ на шасси МАЗ-6317 в масштабе 1:1 проводилось в программном комплексе SolidWorks (рисунок 2а), а разработка их конечно-элементных моделей и расчет – в программном комплексе ANSYS. Конструкции цистерн включают расположенные внутри волноломы и элементы, повышающие их прочность (ребра жесткости), дно цистерн опирается через демпфирующие элементы на два лонжерона. Конструкции цистерн ПА выполнены из нержавеющей стали марки AISI 430 2В (12Х17 по ГОСТ 5582-1975). Разработанные их конечно-элементные модели содержат более 300 000 элементов и узлов (рисунок 2б).

Аппроксимации для моделирования НДС цистерн ПА задавались функциями формы, характеризующими перемещения элементов их конструкций:

$$W = W_0 \sin \frac{\pi x}{l}, \quad (4)$$

где W – прогиб стенки, м;

W_0 – максимальный прогиб стенки, м;

x – перемещение, м;

l – длина стенки, м.

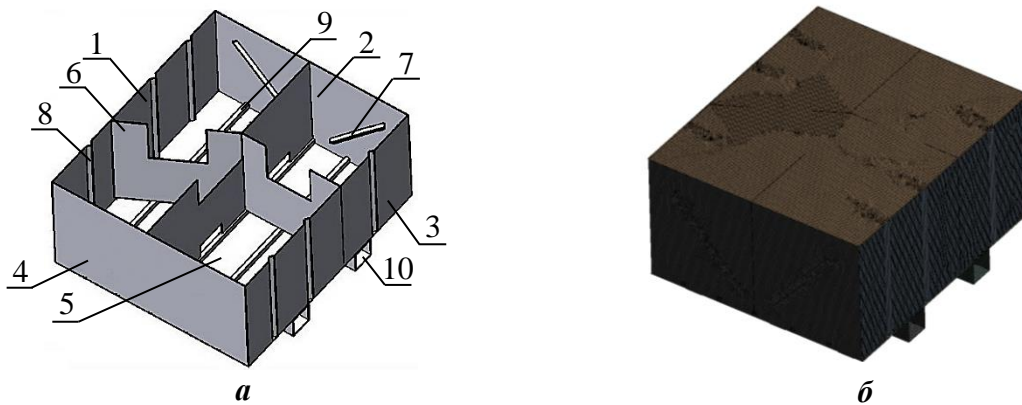
Используя формулу (4), получено соотношение, позволяющее определить максимальное значение относительной деформации ε_m стенок цистерн ПА:

$$\varepsilon_m = 2,45 \frac{i}{b\sqrt{E\rho}}, \quad (5)$$

где i – удельный импульс, Н·с/м²;

b – толщина стенки, м;

ρ – плотность стали, кг/м³.

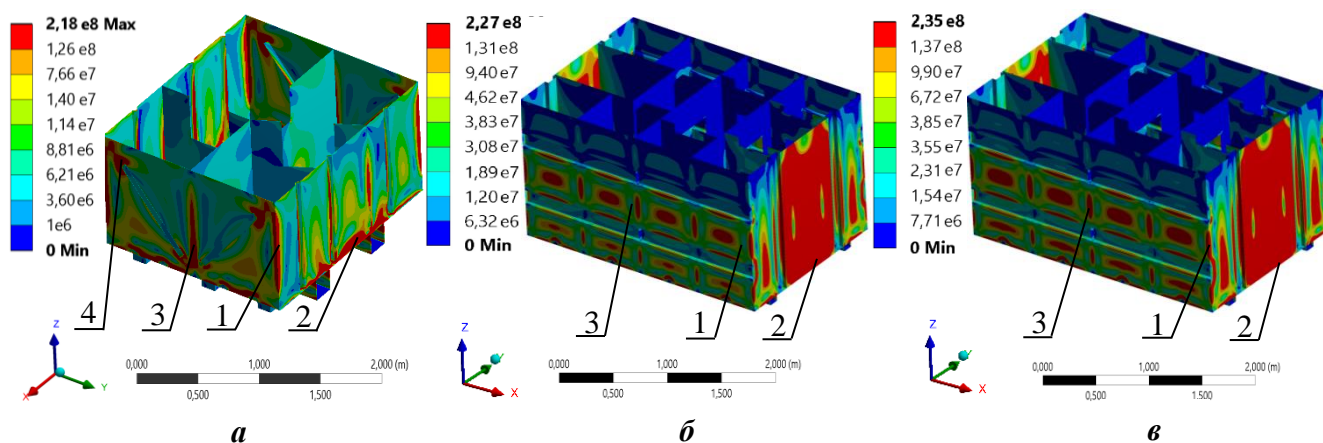


- 1 – передняя стенка; 2, 4 – боковые стенки; 3 – задняя стенка; 5 – дно;
 6 – волноломы (внутренние продольные и поперечные); 7, 8 – ребра жесткости;
 9 – поперечные усиления в виде профилей П-образного сечения;
 10 – продольные лонжероны

Рисунок 2. – 3D модель серийной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337 (а) и ее конечно-элементная модель (б)

Расчет конечно-элементных моделей цистерн ПА позволил исследовать характер формирования и распределения полей напряжений, возникающих в конструкциях, а также установить наиболее нагруженные узлы (рисунок 3).

Анализ полученных результатов расчета позволил установить, что наибольшие эквивалентные напряжения по Мизесу в конструкциях цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337 (рисунок 4), а также 8 и 10 м³ на шасси МАЗ-6317, возникают при моделировании режима № 2, при этом коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил соответственно $n_T = 1,1-1,3; 1,2-1,5; 1,1-1,4$, что, как показывает опыт эксплуатации, недостаточно для конструкций данного типа. В связи с этим, данный режим движения ПА принят для проведения дальнейших проектных расчетов.



1 – угловые соединения стенок; 2 – угловые соединения передней, задней стенок и дна; 3 – тавровые соединения волноломов и стенок; 4 – тавровые соединения ребер жесткости и боковых стенок

Рисунок 3. – Модели распределения полей напряжений, возникающих в конструкциях серийных цистерн объемом 5 м³ (а) ПА на шасси МАЗ-5337, 8 м³ (б) и 10 м³ (в) на шасси МАЗ-6317, при моделировании режима движения № 2, Па

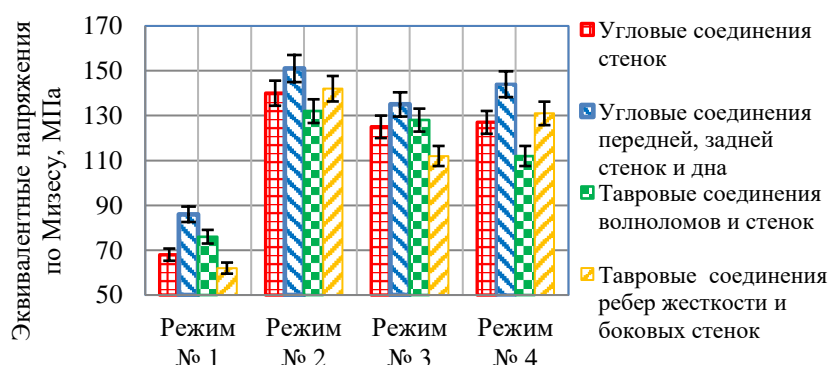


Рисунок 4. – Зависимости эквивалентных напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах серийной цистерны объемом 5 м³, от режимов движения ПА на шасси МАЗ-5337

Проведенный комплекс исследований позволил разработать ряд конструктивных изменений, что обеспечило повышение запаса прочности цистерн ПА. Для снижения напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерн ПА, предложено использовать в вертикальной плоскости под углом 45° к

находящимся в контакте стенкам дополнительные элементы – косынки в виде полосы или уголка. Исследования рациональных геометрических параметров косынок проведены по плану полного факторного эксперимента. В качестве факторов, влияющих на эквивалентные напряжения σ (МПа), выбраны длина z_1 (мм), ширина z_2 и толщина косынок z_3 . Составлено уравнение регрессии, учитывающее их взаимодействие:

$$\sigma = 123,96 - 5,46x_1 - 3,54x_2 - 1,63x_3 + 1,71x_1x_2 - 0,04x_1x_3 - 0,29x_2x_3 - 0,38x_1x_2, \quad (6)$$

где x_1, x_2, x_3 – кодированные факторы z_i .

Значимость коэффициентов полученного уравнения (6) проверена с помощью критерия Стьюдента. Также выполнена проверка уравнения на адекватность по критерию Фишера. После перехода от кодированных переменных к натуральным уравнение приняло следующий вид:

$$\sigma = 163,0438 - 0,037572z_1 - 0,135762z_2 - 1,63z_3 + 0,00011628z_1z_2. \quad (7)$$

Результаты расчета показали, что применение косынок в виде полосы с размерами 900×150×3 мм обеспечило снижение на 27–29 МПа уровня напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337.

Для снижения напряжений, возникающих в областях тавровых соединений волноломов и стенок, проведены исследования рациональных геометрических параметров четырех ребер жесткости в виде уголка равнополочного с размерами 700×60×3 мм, которые закреплены на боковых стенках под углом 45°.

Результаты исследований показали, что увеличение длины на 250 мм (максимальное значение) в верхней и нижней частях данных ребер жесткости обеспечивает снижение на 11–12 МПа уровня напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерны, на 18–21 МПа в областях тавровых соединений волноломов и стенок, а также на 57–61 МПа в областях тавровых соединений ребер жесткости и боковых стенок (рисунок 5).

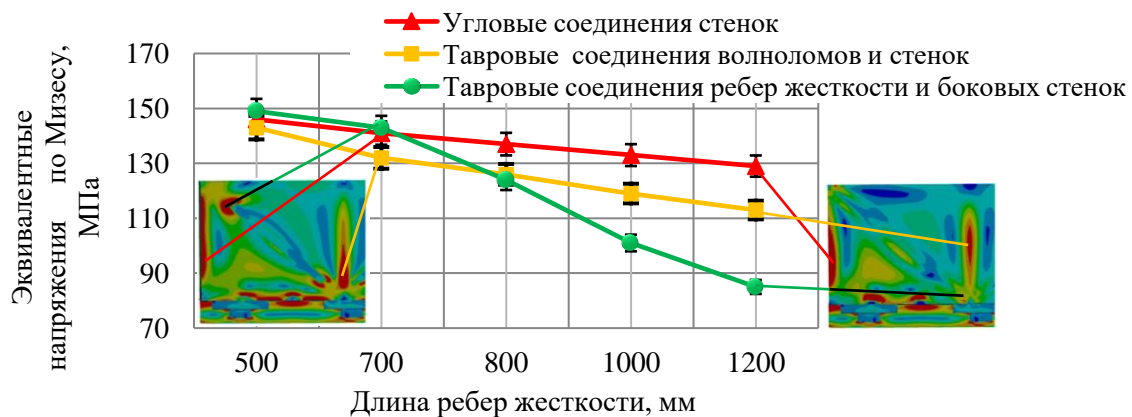


Рисунок 5. – Зависимости эквивалентных напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, от длины ребер жесткости в виде уголка равнополочного и вид распределения полей напряжений в характерных точках на фрагменте боковой стенки конструкции

Для снижения напряжений, возникающих в областях угловых соединений цистерны, соединяющих переднюю, заднюю стенки и дно, предложена дополнительная установка профилей равнополочных П-образного сечения с размерами 50×50×3 мм (двух штук длиной 300 мм, четырех – 400 мм, двух – 780 мм), закрепленных на дне на расстоянии 15–20 мм от угловых соединений передней, задней стенок и дна. Альтернативным решением рассматривалась установка уголков равнополочных. Результаты исследований показали, что применение профилей равнополочных П-образного сечения наиболее эффективно обеспечивает снижение на 29–32 МПа уровня напряжений, возникающих в областях угловых соединений передней, задней стенок и дна, а также на 11–12 МПа в областях угловых соединений стенок (рисунок 6).

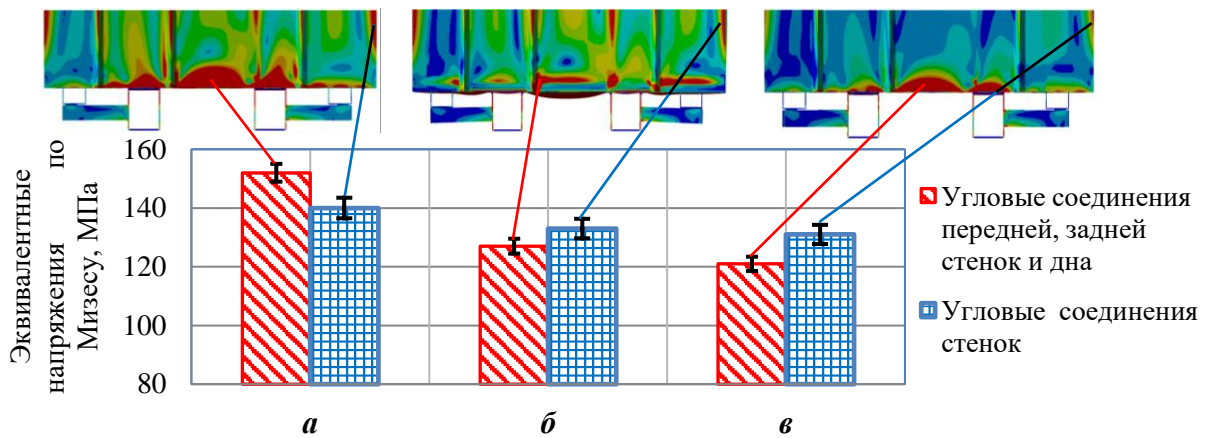


Рисунок 6. – Зависимости эквивалентных напряжений, возникающих в областях угловых соединений элементов цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, от типа их конструкций (серийная (а), модернизированная с установкой уголков (б) и профилей П-образного сечения (в)) и вид распределения полей напряжений в характерных точках на фрагменте передней стенки конструкции

Комплексная реализация разработанных рекомендаций по проектированию осуществлена в 3D модели модернизированной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337. На рисунке 7 представлен результат расчета ее напряженного состояния, а на рисунке 8 – результаты исследований эквивалентных напряжений, возникающих в серийной и модернизированной конструкциях цистерн объемом 5 м³ при моделировании режима № 2 движения ПА на шасси МАЗ-5337.

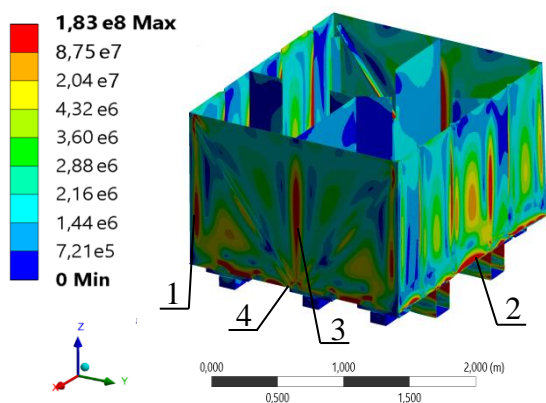


Рисунок 7. – Распределение полей эквивалентных напряжений в модернизированной цистерне объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, Па

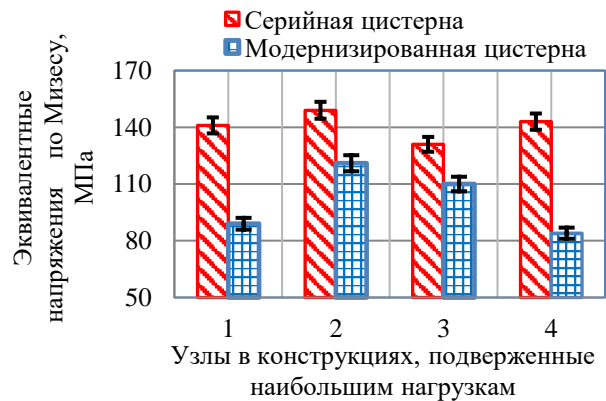


Рисунок 8. – Зависимости эквивалентных напряжений, возникающих в конструкциях цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, от их типа

На основании проведенных исследований установлено снижение уровня напряжений на 21–60 МПа, возникающих в конструкции модернизированной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, по сравнению с серийной, при этом коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил $n_T = 1,4-2$.

Проектируемые современные цистерны ПА схожи по форме, конструктивному исполнению и расположению элементов. В связи с этим, представленные научно-обоснованные решения по модернизации серийных цистерн объемом 5 м³ ПА на

шасси МАЗ-5337, а также результаты исследований рациональных геометрических параметров горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках серийных цистерн объемом 8 и 10 м³ ПА на шасси МАЗ-6317, позволили разработать их модернизированные конструкции, обеспечивающие снижение уровня напряжений на 26–56 МПа и 29–53 МПа соответственно, возникающих в наиболее нагруженных узлах, при этом коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил $n_T = 1,6–2,1$ и $1,5–2,0$.

На основании результатов исследований установлены новые закономерности, связывающие уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах цистерн объемом 5, 8 и 10 м³, с режимами движения ПА на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317, а также типом, размерами и расположением элементов, повышающих прочность их конструкций. Модернизированные конструкции цистерн ПА защищены патентами.

Четвертая глава посвящена практической апробации полученных результатов исследований в аварийно-спасательных подразделениях МЧС Республики Беларусь. На рисунке 9 представлен фрагмент конструкции модернизированной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337.



- 1 – боковая стенка; 2 – передняя стенка; 3 – дно; 4 – ребро жесткости на боковой стенке; 5 – ребро жесткости на передней стенке; 6 – профиль П-образного сечения; 7 – косынка; 8 – удлиненное ребро жесткости на боковой стенке; 9 – дополнительный профиль П-образного сечения

Рисунок 9. – Фрагмент конструкции модернизированной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337 (вид изнутри углового соединения передней и боковой стенок)

При помощи измерительного тензометрического комплекса исследованы переменные напряжения, возникающие в областях угловых соединений серийной и модернизированной цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337 (рисунок 10). Испытания проводились в установленных режимах движения в соответствии с разработанной методикой. Места установки датчиков в конструкции определялись на основании результатов компьютерного моделирования.



- 1 – прецизионный прибор;
2 – тензометрические датчики;
3 – портативный компьютер

Рисунок 10. – Расположение измерительного комплекса на ПА

В таблице 2 представлены максимальные значения главных нормальных напряжений, зафиксированных тензометрическим комплексом при проведении испытаний серийной и модернизированной цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси MAZ-5337. В результате экспериментальных исследований подтверждено, что модернизация цистерн ПА обеспечивает снижение уровня повторно-переменных напряжений, возникающих в процессе эксплуатации в областях углового соединения передней и боковой стенок на 30–32 %, а также передней стенки и дна на 13–15 %.

Таблица 2. – Максимальные значения главных нормальных напряжений, зафиксированных в конструкциях цистерн объемом 5 м³ во время испытаний ПА на шасси MAZ-5337, МПа

Узлы конструкций	Серийная цистерна	Модернизированная цистерна
Угловое соединение передней и боковой стенок	158 ± 4,7	108 ± 3,2
Угловое соединение передней стенки и дна	173 ± 3,7	149 ± 4,6

Проведен расчет коэффициентов запаса прочности по пределу выносливости n_τ для угловых сварных соединений цистерн ПА:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1} - \Psi_\sigma \tau_m}{\tau_a K_\sigma}, \quad (8)$$

где τ_{-1} – предел выносливости, МПа;

τ_a – амплитуда цикла, МПа;

τ_m – среднее напряжение цикла, МПа;

K_σ – коэффициент, учитывающий совместное влияние концентрации напряжений, качества обработки поверхности и размеров детали;

Ψ_σ – коэффициент, учитывающий влияние асимметрии цикла на предел выносливости.

Также определен коэффициент запаса прочности при переменных напряжениях по пределу текучести n_σ :

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_a + \sigma_m}. \quad (9)$$

Проверочный расчет на прочность при переменных напряжениях позволил установить низкий запас прочности по пределу текучести для серийной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337 в областях угловых соединений $n_{\sigma} = 1,18-1,19$, при этом в модернизированной конструкции составил $n_{\sigma} = 1,38-1,9$. Экспериментально подтверждено, что модернизированные цистерны ПА обладают повышенным в 1,2–1,6 раза запасом прочности. Сравнительный анализ результатов прочностных расчетов цистерн ПА представлен в таблице 3.

Таблице 3. – Расчетные значения коэффициентов запаса прочности серийных и модернизированных цистерн ПА на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317

Узлы в конструкциях, подверженные наибольшим нагрузкам	Расчетные значения коэффициентов запаса прочности цистерн ПА (серийная/модернизированная)					
	объемом 5 м ³ на шасси МАЗ-5337		объемом 8 м ³ на шасси МАЗ-6317		объемом 10 м ³ на шасси МАЗ-6317	
	n_T	n_T	n_T	n_T	n_T	n_T
Угловые соединения стенок	3,4/4,6	1,2/1,9	3,6/4,8	1,4/2,1	3,5/4,6	1,3/2,0
Угловые соединения стенок и дна	2,4/3,2	1,1/1,4	2,9/3,5	1,2/1,6	2,5/3,3	1,1/1,5

Проведено техническое диагностирование модернизированных цистерн ПА с применением визуального метода неразрушающего контроля. Обследование цистерн осуществлялось после проведения работ по их модернизации, а также ежегодно в пожарных аварийно-спасательных подразделениях, эксплуатирующих данную технику (таблица 4).

Таблица 4. – Данные о количестве ремонтов цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, модернизированных в процессе эксплуатации

№ ПА	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	В	Р	0	Р	0	0	Р	0	Р/М	0	0	0	0
2	–	В	0	0	Р	0	Р	Р	0	Р/М	0	0	0
3	В	0	Р	Р	0	Р	0	Р	0	Р/М	0	0	0
4	В	0	0	Р	0	Р	Р	0	Р	Р/М	0	0	0

Примечания:

В – год ввода в эксплуатацию;

М – год проведения модернизации;

Р – год проведения ремонта;

0 – год без ремонта.

В результате обследований установлено, что модернизация цистерн ПА позволила увеличить их межремонтный период в 1,5–2 раза.

Полученные результаты позволяют повысить боевую готовность подразделений МЧС и эффективность использования пожарной аварийно-спасательной техники на территории Республики Беларусь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана расчетная методика, которая основана на двухэтапном подходе к моделированию напряженного состояния конструкций цистерн прямоугольного сечения, включающем экспериментальное установление значений ускорения, возникающего в конструкциях под действием инерционных нагрузок, и разработку расчетных конечно-элементных моделей, которые адаптированы к параметрам (скорость, ускорение, торможение, поворот) и условиям (вид дорожного покрытия), характеризующим особенности режимов движения ПА. Методика обеспечила в комплексе с проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями разработку защищенных патентами конструкций цистерн ПА с повышенным запасом прочности (n_t в 1,3–1,6 раза; n_σ в 1,2–1,6 раза; n_τ в 1,3–1,5 раза) по сравнению с серийными [1–4, 8, 11–14, 19, 23, 24, 26, 27].

2. В результате экспериментальных исследований установлены зависимости, связывающие режимы движения ПА на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317 со значениями ускорения, возникающего под действием инерционных нагрузок в конструкциях цистерн объемом 5, 8 и 10 м³. Полученные для каждого режима движения максимальные значения ускорения, которые составляют от 7,4 до 25,2 м/с² в зависимости от модели ПА, использованы при конечно-элементном моделировании. Определено, что наиболее нагруженным режимом является движение ПА по грунтовой дороге категории VI-б с допустимой скоростью 20–30 км/ч [3, 8, 11–13, 15, 26].

3. Разработаны новые 3D конечно-элементные модели цистерн прямоугольного сечения объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, а также объемом 8 и 10 м³ на шасси МАЗ-6317. Установлено, что при движении ПА в конструкциях серийных цистерн максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу в угловых и тавровых соединениях элементов достигают 136–156 МПа, 137–176 МПа, 151–191 МПа соответственно, при этом коэффициент запаса прочности составил $n_t = 1,1–1,3$; $1,2–1,5$; $1,1–1,4$ соответственно, что, как показывает опыт эксплуатации, недостаточно для конструкций данного типа. Показано, что существенное влияние на формирование напряженного состояния угловых соединений цистерн ПА оказывают растягивающие напряжения [1, 3–6, 8, 12, 15, 16, 20, 21, 26, 27].

4. Установлены закономерности, связывающие уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах, с режимами движения ПА на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317, типом, размерами и расположением элементов,

повышающих прочность цистерн. Показано, что научно-обоснованное применение данных элементов: косынок в виде полосы в вертикальной плоскости под углом 45° к находящимся в контакте стенкам; ребер жесткости в виде уголка равнополочного, расположенных на боковых стенках под углом 45° ; профилей равнополочных П-образного сечения, закрепленных на дне на расстоянии 15–20 мм от угловых соединений передней, задней стенок и дна; горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках, – обеспечивает снижение уровня напряжений на 24–61 МПа, 26–56 МПа; 29–53 МПа в угловых и тавровых соединениях элементов цистерн объемом 5, 8 и 10 м³ соответственно, обеспечив при этом повышение коэффициентов запаса прочности до значений, составляющих $n_\tau = 1,4\text{--}2,0$; $1,6\text{--}2,1$; $1,5\text{--}2,0$ соответственно [3–8, 11–13, 15–18, 22].

5. В результате экспериментальных исследований установлены зависимости, связывающие уровень повторно-переменных напряжений, возникающих в конструкциях цистерн прямоугольного сечения, с режимами движения ПА. Показано, что в угловых соединениях стенок серийной цистерны максимальные значения главных нормальных напряжений составляют $\sigma_{max} = 158 \pm 4,7$ МПа, а стенок и дна – $173 \pm 3,7$ МПа, при этом в модернизированной цистерне – $108 \pm 3,2$ МПа и $149 \pm 4,6$ МПа соответственно. Проверочный расчет на прочность при переменных напряжениях позволил установить низкий запас прочности по пределу текучести для серийной конструкции в областях угловых соединений $n_\sigma = 1,18\text{--}1,19$, при этом запас прочности по пределу выносливости составил $n_\tau = 2,42\text{--}3,43$. Проверочный расчет модернизированной цистерны показал повышение запаса прочности по пределу текучести в областях угловых соединений $n_\sigma = 1,38\text{--}1,9$, при этом запас прочности по пределу выносливости составил $n_\tau = 3,19\text{--}4,64$. Определено, что расхождение полученных значений максимальных нормальных напряжений, возникающих в угловых соединениях серийной и модернизированной цистерн ПА методом компьютерного моделирования, по сравнению с данными натуральных испытаний, не превышает 8 % [7, 9, 10, 13, 25].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанная расчетная методика внедрена в ООО «ПОЖСНАБ» и использована при проектировании новых цистерн ПА на шасси МАЗ-6317. Результаты исследований позволили разработать рациональные геометрические параметры ребер жесткости на боковых стенках, что обеспечило снижение уровня напряжений более чем на 30 %, возникающих при эксплуатации в угловых соединениях стенок их конструкций (акт внедрения от 19.10.2017).

Разработанная расчетная методика внедрена в ОАО «Гомсельмаш» и использована при разработке опор крепления и корпусов конструкций баков энергосредств УЭС-2-250А, УЭС-2-280А, УЭС-250, применяемых в сельскохозяйственных машинах. Полученные результаты позволили повысить их надежность при эксплуатации и долговечность [2] (акт внедрения от 22.12.2017).

2. В производственно-технический центр учреждения «Гомельское областное управление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» внедрены разработанная расчетная методика и запатентованные конструкции цистерн повышенной прочности ПА [28, 29], а также проведена модернизация четырех цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337 (акты использования от 25.07.2017 и 06.06.2018), что обеспечило увеличение в 1,5–2 раза их межремонтного периода (акты осмотров от 27.07.2018, 29.07.2019, 19.08.2020 и 02.08.2021).

Экономический эффект от использования разработки составил 1328,34 бел. руб. на одну единицу техники (акт внедрения от 29.07.2019), а ожидаемый экономический эффект для Республики Беларусь с учетом прогнозируемого срока эксплуатации 10 лет модернизированных цистерн ПА на шасси МАЗ-5337 – 121 733,7 бел. руб. (по состоянию на 22.07.2019).

3. Результаты исследований внедрены в учебный процесс государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Гомельского филиала Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, филиала «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты МЧС Беларуси и учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого» (акты внедрения от 27.09.2017, 28.11.2017, 13.07.2018, 20.05.2019 и 20.01.2022).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных рецензируемых журналах и сборниках

1. Короткевич, С. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Вестник Воронежского ин-та. ГПС МЧС России. – 2017. – № 4 (25). – С. 45–51.

2. Короткевич, С. Г. Оценка эксплуатационной надежности топливных баков с опорами креплений зерноуборочных комбайнов методом компьютерного моделирования / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун, А. Н. Вырский // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2017. – № 4. – С. 10–18.

3. Ковтун, В. А. Компьютерное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. А. Жаранов // Вестник Ун-та. граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 81–90.

4. Ковтун, В. А. Оптимизация конструкции цистерны пожарного автомобиля АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 методом компьютерного моделирования / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. Н. Пасовец, И. Тодоров // Вестник Ун-та. граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 38–45.

5. Короткевич, С. Г. Эксплуатационная надежность цистерн пожарных автомобилей: модернизация стальных конструкций в целях повышения их механических характеристик / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Вестник ПГУ. Серия В. – 2019. – № 3. – С. 90–94.

6. Kovtun, V. Optimization of Fire Truck's Tanks on the Chassis MAZ-6317 by the Method of Computer Simulation / V. Kovtun, S. Korotkevich, Y. Mirchev, V. Lodnya // International Journal «NDT Days». – 2019. – Vol. II, iss. 4. – P. 495–500.

7. Ковтун, В. А. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния угловых сварных соединений цистерн при движении пожарного автомобиля / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. А. Лодня // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2020. – № 2. – С. 59–67.

8. Ковтун, В. А. Исследование влияния геометрических параметров элементов конструкции цистерны на ее прочностные характеристики при модернизации пожарных автомобилей / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич // Вестник Ун-та. граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 316–327.

9. Kovtun, V. Damage features of tanks of fire trucks and strength assessment of their welded joints / V. Kovtun, S. Korotkevich, Y. Pleskachevsky // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. – 2021. – № 1 (54). – С. 15–20.

10. Ковтун, В. А. Расчет на прочность угловых сварных соединений цистерн пожарных автомобилей при возникающих в процессе движения переменных напряжениях / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, И. А. Баран // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 35–43.

11. Короткевич, С. Г. Экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния цистерн пожарных автомобилей в процессе их эксплуатации / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып. 14. – С. 112–118.

12. Ковтун, В. А. Исследование напряженного состояния цистерн водоизмещением восемь тонн при движении пожарных автомобилей к месту ликвидации чрезвычайных ситуаций / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 39–47.

13. Ковтун, В. А. Расчет и проектирование цистерн прямоугольного сечения пожарных автомобилей с повышенными прочностными характеристиками / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. А. Лодня // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 34–37.

Статьи в сборниках международных конференций

14. Короткевич, С. Г. Использование компьютерного моделирования для контроля и прогнозирования свойств материалов и изделий в пожарной аварийно-спасательной технике / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы : сб. статей VI Всероссийской науч.- практ. конф.

23–24 сент. 2015 г. : в 2-х ч. / ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России ; редкол.: А. М. Гаврилов [и др.]. – Воронеж, 2015. – Ч. 2. – С. 318–321.

15. Короткевич, С. Г. Проектирование и оптимизация конструкции цистерны пожарного автомобиля методом компьютерного моделирования / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Надежность и долговечность машин и механизмов : сб. матер. IX Всерос. науч.-практ. конф., Иваново, 12 апреля 2018 г. / ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России ; редкол.: В. А. Годлевский [и др.]. – Иваново, 2018. – С. 115–119.

16. Короткевич, С. Г. 3D компьютерное моделирование напряженного состояния угловых сварных соединений стенок цистерны пожарного автомобиля при движении / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Надежность и долговечность машин и механизмов : сб. матер. XI Всерос. науч.-практ. конф., Иваново, 16 апреля 2020 г. / ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России ; редкол.: В. А. Годлевский [и др.]. – Иваново, 2020. – С. 210–214.

17. Короткевич, С. Г. Оптимизация геометрических параметров элементов конструкции цистерны пожарного автомобиля с применением численных методов расчета / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXII Междунар. науч.-практ. конф., Москва / ФГБУ ВНИИПО МЧС России ; редкол.: Е. Ю. Сушкина (отв. ред.) [и др.]. – М. : ВНИИПО, 2020. – С. 729–734.

18. Короткевич, С. Г. Проектирование модернизированных цистерн пожарных автомобилей с учетом эксплуатационных нагрузок / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Надежность и долговечность машин и механизмов : сб. матер. XIII Всерос. науч.-практ. конф., Иваново, 14 апреля 2022 г. / ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России ; редкол.: В. А. Годлевский [и др.]. – Иваново, 2022. – С. 363–369.

Материалы международных конференций

19. Ковтун, В. А. Использование компьютерного моделирования для прогнозирования работы деталей и узлов пожарной аварийно-спасательной техники / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 19–20 мая 2016 г. / Гомел. инженер. ин-т ; редкол.: А. Э. Набатова (науч. ред.) [и др.]. – Гомель : ГИИ, 2016. – С. 196–197.

20. Короткевич, С. Г. Прогнозирование эксплуатационной надежности пожарных автоцистерн с применением подходов компьютерного моделирования / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Горение и проблемы тушения пожаров : материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 4–5 июля 2017 г. : в 2-х ч. ; редкол.: Е. Ю. Сушкина (отв. ред.) [и др.]. – М. : ВНИИПО, 2017. – Ч. 2. – С. 437–439.

21. Короткевич, С. Г. Адаптивная конечно-элементная модель цистерны пожарного автомобиля / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Обеспечение безопасности жизнедеятельности : проблемы и перспективы : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 4–5 апреля 2018 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси ; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск : УГЗ, 2018. – С. 130–131.

22. Короткевич, С. Г. Повышение эксплуатационной надежности цистерн пожарных автомобилей АЦ-5.0-50/4 / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун, И. Тодоров // Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019–2030 годы; материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27 сент. 2018 г. ; редкол.: И. И. Полевода (гл. ред.) [и др.]. – Минск : УГЗ, 2018 г. – С. 87–89.

23. Короткевич, С. Г. Оценка применения пожарных автомобилей с повышенным объемом цистерны для жидкости / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы; материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 3–4 апр. 2019 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси ; редкол.: И. И. Полевода (гл. ред.) [и др.]. – Минск : УГЗ, 2019. – 125 с.

24. Korotkevich, S. G. Research of the stress-strain state of fire tank truck construction / S. G. Korotkevich // Proc. XII Intern. scientific-practical conf. «Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy», Minsk, April 3–4, 2019 / University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. – Minsk, 2019. – P. 242–243.

25. Короткевич, С. Г. Методика исследований механических напряжений пожарных автоцистерн при эксплуатации / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Обеспечение безопасности жизнедеятельности : проблемы и перспективы : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 8–9 апр. 2020 г. : в 2 т. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси ; редкол.: И. И. Полевода (гл. ред.) [и др.]. – Минск : УГЗ, 2020. – Т. 1. – С. 239–241.

26. Короткевич, С. Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния цистерн пожарных автомобилей в условиях оперативного движения к месту ликвидации чрезвычайных ситуаций / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун, О. В. Никитин // Обеспечение безопасности жизнедеятельности : проблемы и перспективы : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 7–8 апр. 2021 г. : в 2 т. / Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси ; редкол.: В. А. Бирюк [и др.]. – Минск : УГЗ, 2021. – Т. 1, Ч. 2. – С. 378–380.

27. Короткевич, С. Г. Надежность цистерн пожарных автомобилей на шасси нового поколения при движении к месту ликвидации чрезвычайных ситуаций / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 нояб. 2021 г. : в 2-х ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус.

гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – Ч. 2. – С. 279–280.

Объекты интеллектуальной собственности

28. Пожарная цистерна : полез. модель ВУ 11787 / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. Н. Пасовец. – Оpubл. 30.10.2018.

29. Цистерна пожарного автомобиля: полез. модель ВУ 12486 / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич. – Оpubл. 28.02.2021.

РЭЗІЮМЭ

Караткевіч Сяргей Генадзьевіч

РАЗЛІК І ПРАЕКТАВАННЕ ЦЫСТЭРН ПРАМАВУГОЛЬНАГА СЯЧЭННЯ ПАВЫШАНАЙ ТРЫВАЛАСЦІ ПАЖАРНЫХ АЎТАМАБІЛЯЎ

Ключавыя словы: пажарны аўтамабіль, цыстэрна, праектаванне, рэжым руху, напружаны стан, паскарэнне, камп'ютэрнае мадэляванне, рабро калянасці, запас трываласці.

Мэта працы – разлік і праектаванне цыстэрн прамавугольнага сячэння павышанай трываласці пажарных аўтамабіляў з улікам асаблівасцей іх эксплуатацыйнай нагружанасці.

Метады даследавання і апаратура. Даследаванні напружанага стану і запасу трываласці канструкцый цыстэрн пажарных аўтамабіляў праводзіліся ў адпаведнасці з распрацаванай разліковай метадыкай, рэалізаванай у спалучэнні з праграмным комплексам ANSYS. Для даследавання эксплуатацыйных характарыстык і тэхнічнага стану цыстэрн выкарыстоўваліся дыягнастычны комплекс на аснове прыбора Larson-Davis 2900, тэнзаметрычны комплекс на аснове прэцызійнага прыбора MT-D4, камплект візуальнага інспектарскага кантролю (ВІК-1), фота-відэакамера. Апрацоўка эксперыментальнай інфармацыі праводзілася на аснове метадаў матэматычнай статыстыкі ў рэдактары электронных табліц Microsoft Excel.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана, навукова абгрунтавана, эксперыментальна пацверджана і прамыслова праверана метадыка мадэлявання напружанага стану канструкцый цыстэрн прамавугольнага сячэння пажарных аўтамабіляў; усталяваны заканамернасці, якія злучаюць узровень высілкаў, узнікаючых у найбольш нагружаных вузлах, з рэжымамі руху пажарных аўтамабіляў, а таксама тыпам, памерамі і размяшчэннем элементаў, павышаючых трываласць канструкцый цыстэрн. Распрацаваны і ўкаранёны ў аварыйна-выратавальныя падраздзяленні МНС Рэспублікі Беларусь канструкцыі цыстэрн прамавугольнага сячэння з павышаным у 1,2–1,6 разы запасам трываласці і павялічаным не менш чым у 1,5–2 разы міжрамонтным перыядам.

Ступень выкарыстання. Вынікі працы выкарыстаны пры праектаванні новых цыстэрн павышанай трываласці пажарных аўтамабіляў на ТАА «ПАЖЗАБ», пры мадэрнізацыі эксплуатаваных цыстэрн у пажарных аварыйна-выратавальных падраздзяленнях МНС Рэспублікі Беларусь, пры распрацоўцы апор мацавання і карпусоў канструкцый бакаў энергасродкаў на ААТ «Гомсельмаш» і ў вучэбным працэсе ўстаноў вышэйшай адукацыі Рэспублікі Беларусь, у тым ліку, Універсітэт грамадзянскай абароны МНС Беларусі, ГДТУ ім. П.В.Сухога.

Вобласць прымянення. Пажарныя аварыйна-выратавальныя падраздзяленні, вытворча-тэхнічныя цэнтры, прамысловыя прадпрыемствы і вышэйшыя навучальныя ўстановы.

РЕЗЮМЕ

Короткевич Сергей Геннадьевич

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИСТЕРН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Ключевые слова: пожарный автомобиль, цистерна, проектирование, режим движения, напряженное состояние, ускорение, компьютерное моделирование, ребро жесткости, запас прочности.

Цель работы – расчет и проектирование цистерн прямоугольного сечения повышенной прочности пожарных автомобилей с учетом особенностей их эксплуатационной нагруженности.

Методы исследования и аппаратура. Исследования напряженного состояния и запаса прочности конструкций цистерн пожарных автомобилей проводились в соответствии с разработанной расчетной методикой, реализованной в сочетании с программным комплексом ANSYS. Для оценки эксплуатационных характеристик и технического состояния цистерн использовались диагностический комплекс на основе прибора Larson-Davis 2900, тензометрический комплекс на основе прецизионного прибора МТ-D4, комплект визуального инспекторского контроля (ВИК-1), фото-видеокамера. Обработка экспериментальных данных проводилась на основе методов математической статистики в редакторе электронных таблиц Microsoft Excel.

Полученные результаты и их новизна. Разработана, научно обоснована, экспериментально подтверждена и промышленно апробирована методика моделирования напряженного состояния конструкций цистерн прямоугольного сечения ПА; установлены закономерности, связывающие уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах, с режимами движения пожарных автомобилей, а также типом, размерами и расположением элементов, повышающих прочность конструкций цистерн. Разработаны и внедрены в аварийно-спасательные подразделения МЧС Республики Беларусь конструкции цистерн прямоугольного сечения с повышенным в 1,2–1,6 раза запасом прочности и увеличенным не менее чем в 1,5–2 раза межремонтным периодом.

Степень использования. Результаты работы использованы при проектировании новых цистерн повышенной прочности пожарных автомобилей на ООО «ПОЖСНАБ», при модернизации эксплуатируемых цистерн в пожарных аварийно-спасательных подразделениях МЧС Республики Беларусь, при разработке опор крепления и корпусов конструкций баков энергосредств на ОАО «Гомсельмаш» и в учебном процессе учреждений высшего образования Республики Беларусь, включая, Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, ГГТУ им. П.О.Сухого.

Область применения. Пожарные аварийно-спасательные подразделения, производственно-технические центры, промышленные предприятия и высшие учебные заведения.

SUMMARY

Sergey Korotkevich

CALCULATION AND DESIGN OF RECTANGULAR TANKS WITH INCREASED STRENGTH OF FIRE TRUCKS

Key words: fire truck, tank, design, motion mode, stress state, acceleration, computer simulation, stiffener, margin of safety.

The purpose of the work is to calculate and to design the rectangular tanks with increased strength of the fire truck by taking into account peculiarities of their operational loading.

Research methods and used equipment. Studies of the stress state and safety margin of the fire truck's tanks structures were carried out in accordance with the developed calculation methodology implemented in combination with the ANSYS software package. To assess the operational characteristics and technical diagnostics of the fire truck's tanks such devices as a diagnostic complex based on the Larson-Davis 2900 machine, a strain gauge complex based on the MT-D4 precision instrument, a visual inspection kit (VIK-1) and a photo-video camera were used. The experimental data were processed using the methods of mathematical statistics in the Microsoft Excel spreadsheet editor.

Obtained results and their novelty. The methodology for modeling the stress state of rectangular tank structures of a fire truck's tanks has been developed, scientifically substantiated, experimentally confirmed and industrially tested; the regularities linking the stress level arising in the most loaded nodes with the modes of movement of the fire truck's tanks, as well as with the type, size and location of elements that increase the strength of tank structures have been established. The rectangular tank designs with a 1.2–1.6-fold increased margin of safety and an increased inter-repair period of at least 1.5–2 times have been developed and implemented in the emergency rescue units of the MES of the Republic of Belarus.

Extent of use. The results of the research were used in the design of new high-strength fire truck's tanks at LLC POZHSNAB, in the operating tanks' modernization in the fire emergency rescue units of the MES of the Republic of Belarus, in the development of mounting supports and housing structures of power equipment tanks at JSC Gomselmash. Also the results are applied in the educational process in the higher educational institutions of the Republic of Belarus, including University of Civil Protection of the MES of the Republic of Belarus, Sukhoi State Technical University of Gomel.

Field of application. Firefighting rescue units, production and technical centers, industrial enterprises and higher educational institutions.



Научное издание

КОРОТКЕВИЧ
Сергей Геннадьевич

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИСТЕРН ПРЯМОУГОЛЬНОГО
СЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.02 – машиноведение, системы приводов и детали машин

Подписано в печать 27.10.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,76. Тираж 75. Заказ 655.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.