

УДК 614.846.63:004.94

**ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЁЖНОСТЬ ЦИСТЕРН ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ:
МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК****С.Г. КОРОТКЕВИЧ***(Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск);**д-р техн. наук, проф. В.А. КОВТУН**(Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси)*

Опираясь на анализ применения аварийно-спасательной техники на территории Республики Беларусь, определена основная техническая единица в привлечении к ликвидации чрезвычайных ситуаций – пожарная автоцистерна. Установлено, что в большинстве случаев причина её ремонта и вывода из боевого расчёта заключается в нарушении герметичности цистерны. С применением подходов адаптивного компьютерного моделирования проведены исследования напряжённо-деформированного состояния и выполнена оценка прочностных свойств конструкции цистерны пожарного автомобиля. В целях оптимизации существующей конструкции по критерию коэффициента запаса прочности выполнены проектные расчёты, на основе которых разработаны рекомендации по модернизации конструкции цистерны в целях повышения её эксплуатационной надёжности и увеличения межремонтного периода обслуживания.

Ключевые слова: *пожарный автомобиль, цистерна, напряжения, компьютерное моделирование, проектирование, сварное соединение, запас прочности.*

Введение. В настоящее время проведение и реализация мероприятий по обновлению и модернизации пожарной аварийно-спасательной техники – одна из приоритетных задач Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Статистика работы пожарных аварийно-спасательных подразделений свидетельствует о том, что 98% от общего числа погибших приходится на начальный период развития пожаров и чрезвычайных ситуаций, а основной привлекаемой техникой служит пожарная автоцистерна [1].

Анализ записей в журналах учёта технического обслуживания и ремонта техники производственно-технических центров Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь позволил установить, что одна из частых причин нахождения в ремонте пожарного автомобиля – нарушение герметичности цистерны [2].

Конструкция цистерны представляет собой ёмкость прямоугольного сечения, образованного передней, задней, боковыми, верхней и нижней стенками. Внутри расположены рёбра жёсткости, продольные и поперечные волноломы. Основное отличие от других автомобилей, имеющих ёмкости для жидкости, заключается в необходимости обеспечения повышенных требований к прочности конструкции цистерны. Это обусловлено необходимостью следовать к месту вызова на пожар не только по асфальтированным, но и просёлочным дорогам. Пожары нередко возникают в лесах, кустарниках, торфяниках, подъезд к которым затруднён из-за отсутствия ровного дорожного покрытия для такой крупногабаритной техники. В таких условиях при движении корпус испытывает осевые и динамические воздействия, что передаёт значительные, часто критические нагрузки на конструкцию цистерны. В результате особых эксплуатационных режимов при движении на ликвидацию чрезвычайных ситуаций в конструкции цистерны появляются трещины в угловых сварных соединениях стенок цистерны и в угловых сварных соединениях волноломов. Устранение данных повреждений требует большого объёма подготовительных и ремонтных работ, которые ведут к простоев техники в течение продолжительного времени [3–4]. В условиях ограниченного финансирования поддержание оперативных возможностей и ресурса парка пожарных автоцистерн – одна из актуальных задач Министерства по чрезвычайным ситуациям.

Основная часть. Для достижения поставленной цели работы использован методологический подход, основанный на совокупном использовании результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования. Исследование напряжённо-деформированного состояния цистерны пожарного автомобиля проведено с использованием методов компьютерного моделирования. В качестве средства расчёта использовался программный продукт ANSYS. В качестве исходных параметров моделирования использовались геометрические размеры деталей цистерны, физико-механические характеристики материалов и предварительно измеренные значения ускорения, возникающего от вибрации конструктивных элементов при движении [5].

Для проведения эксперимента была выбрана цистерна объёмом 5 м³ пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337, как наиболее распространённая в эксплуатации и уже вышедшая из гарантийного периода обслуживания. Порядок проведения испытаний, разработки компьютерной модели и расчёта в программном продукте ANSYS описаны в научных работах [2; 6; 7]. Анализ полученных результатов

в ходе компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS позволил определить области возникновения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны пожарного автомобиля. Данные области соответствуют: угловым сварным соединениям передней, задней и боковых стенок цистерны, в которых σ_{\max} равны 145 ± 10 МПа; угловым сварным соединениям волноломов к стенкам цистерны, в которых σ_{\max} составляют 136 ± 9 МПа; нахлесточным сварным соединениям ребер жёсткости на боковых стенках цистерны, в которых σ_{\max} равны 148 ± 10 МПа. Полученные результаты хорошо согласуются со сведениями о проблемных местах в конструкциях цистерн данного типа.

В целях снижения возникающих нагрузок в угловых сварных соединениях стенок цистерны пожарного автомобиля предложена дополнительная установка косынок в виде полосы, расположенных в вертикальной плоскости под углом 45 градусов к находящимся в контакте стенкам цистерны. При расчёте в программном комплексе ANSYS установлена зависимость возникающих значений эквивалентных напряжений по Мизесу в угловом сварном соединении цистерны от конструктивного исполнения устанавливаемой косынки (рисунок 1). Оптимизируемыми параметрами косынки служили длина и ширина при постоянной толщине. В результате сравнения различных вариантов конструктивного исполнения косынки в виде полосы при проведении сравнительных расчётов установлены наиболее оптимальные геометрические размеры – длина и ширина, соответственно равные 900 и 150 мм. Данное решение позволило снизить возникающие напряжения на 21% (29 ± 4) МПа.

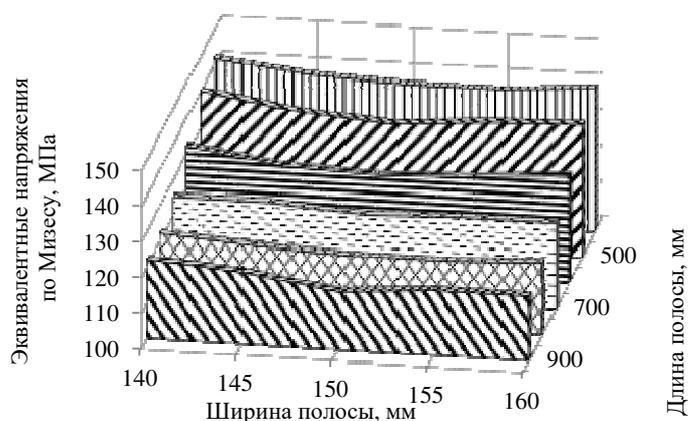
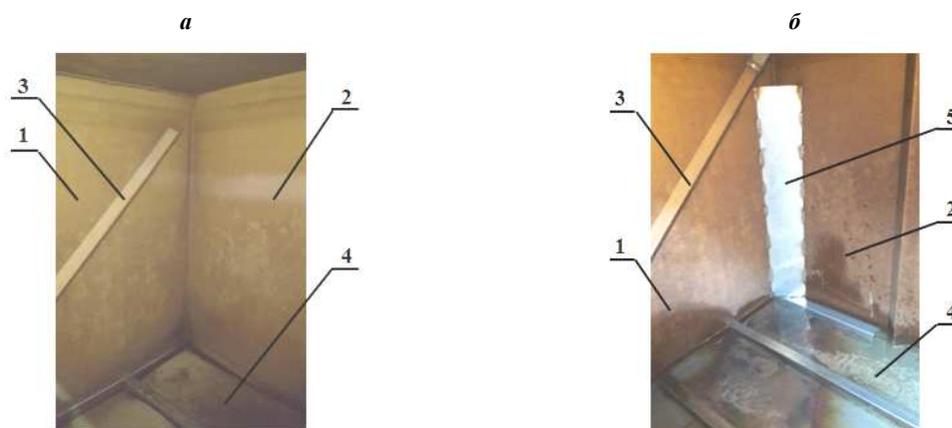


Рисунок 1. – Зависимость эквивалентных напряжений по Мизесу от конструктивных размеров косынки в виде полосы, устанавливаемой в угловом сварном соединении стенок цистерны

На рисунке 2, *а* представлен фотоснимок углового сварного соединения боковой и задней стенки цистерны заводского исполнения; на рисунке 2, *б* – фотоснимок углового сварного соединения боковой и задней стенок модернизированной цистерны с установленным дополнительным элементом в виде косынки.



**1 – боковая стенка цистерны; 2 – задняя стенка цистерны;
3 – ребро жесткости на боковой стенке цистерны; 4 – дно цистерны; 5 – косынка**

Рисунок 2. – Фрагмент внутреннего углового сварного соединения боковой и задней стенок цистерны до изменений (*а*), после изменений (*б*)

Дальнейшие исследования по влиянию конструкционного исполнения цистерны объемом 5 м^3 пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 на её напряжённо-деформированное состояние позволили определить целесообразность увеличения длины ребра жёсткости, установленного на боковых стенках конструкции цистерны. Зависимость возникающих значений эквивалентных напряжений по Мизесу от длины ребра жёсткости, расположенного на боковых стенках конструкции цистерны, представлены на рисунке 3.

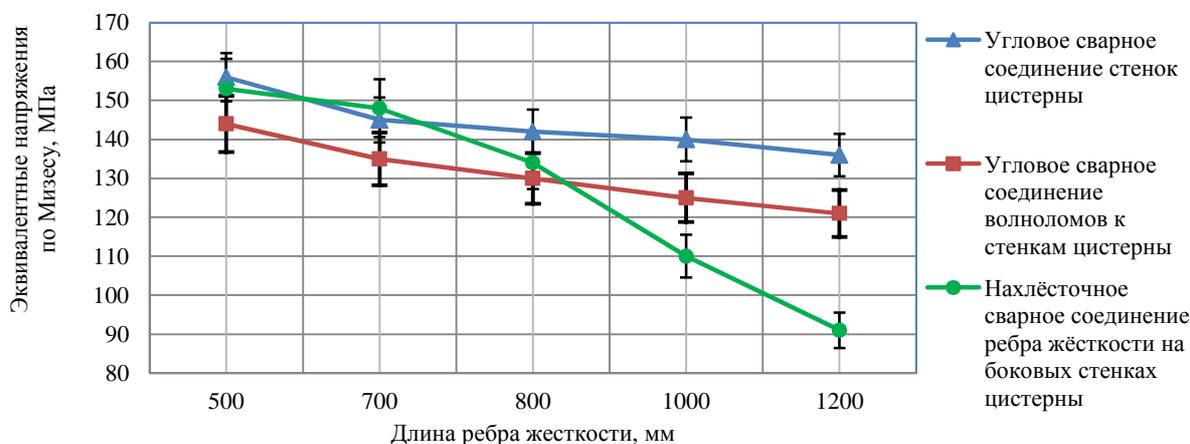
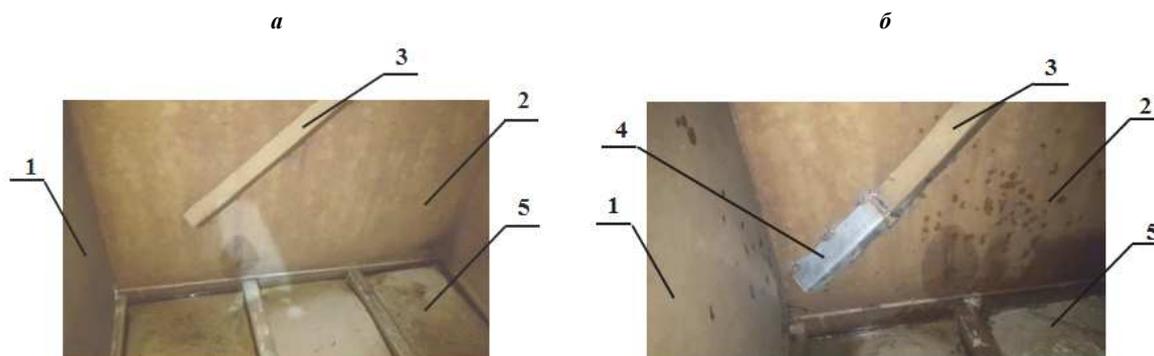


Рисунок 3. – Зависимость эквивалентных напряжений по Мизесу от длины ребра жёсткости, расположенного на боковых стенках цистерны

В результате выполненных расчётов установлено, что увеличение длины ребра жёсткости с 700 мм (заводское исполнение) до его максимальной величины 1200 мм позволяет снизить возникающие напряжения в угловых сварных соединениях стенок цистерны на 5,5% (9 ± 3) МПа. При этом выявлено, что также снижаются возникающие напряжения в угловых сварных соединениях волноломов к стенкам цистерны на 10% (14 ± 3 МПа) и в местах крепления концевых участков рёбер жёсткости к боковым стенкам цистерны на 38% (57 ± 5 МПа). Следует отметить, что при уменьшении длины ребра жёсткости на боковых стенках цистерны пожарного автомобиля наблюдается резкое увеличение напряжений в угловых сварных соединениях стенок цистерны.

На рисунке 4, *а* представлен фотоснимок внутреннего расположения ребра жёсткости на боковой стенке цистерны заводского исполнения; на рисунке 4, *б* – фотоснимок внутреннего расположения ребра жёсткости на боковой стенке модернизированной цистерны.



1 – поперечный волнолом; 2 – боковая стенка цистерны; 3 – ребро жесткости на боковой стенке цистерны; 4 – доработанная часть ребра жесткости; 5 – дно цистерны

Рисунок 4. – Фрагмент внутреннего расположения ребра жёсткости на боковой стенке цистерны до изменений (*а*), после изменений (*б*)

В таблице представлены результаты компьютерного расчёта заводского исполнения конструкции цистерны объемом 5 м^3 пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 и модернизированной, с установленными конструкционными дополнениями.

Сравнительный анализ показал значительное повышение коэффициента запаса прочности и снижение напряжённо-деформированного состояния. Также представлены значения коэффициента запаса прочности в исследуемых областях цистерны, что позволяет судить о надёжности конструкции, способ-

ности выдерживать рабочие нагрузки и, как следствие, о необходимости внесения изменений в конструкцию. При этом необходимо отметить, что рекомендованные значения коэффициентов запаса прочности для пожарных автоцистерн в специальной литературе отсутствуют [8–11], а их выбор осуществляется на основе опыта эксплуатации аналогичных изделий, а значения колеблются в диапазоне 1,7...1,8. Также при определении допускаемых напряжений для сварных швов используется понижающий коэффициент, равный 0,8...0,85, который учитывает то, что в околшовной зоне снижаются механические характеристики основного металла [12], а доступными видами контроля сварных швов являются лишь визуальный и испытания гидростатическим давлением [13; 14].

Таблица. – Результаты исследований возникающих напряжений в конструкции цистерны объёмом 5 м³ пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337

Область максимальных значений эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны	Заводское исполнение конструкции цистерны		Модернизированная конструкция цистерны	
	σ_{\max} , МПа	Запас прочности, n	σ_{\max} , МПа	Запас прочности, n
Угловые сварные соединения передней, задней и боковых стенок цистерны	145 ± 10	1,17	107 ± 7	1,57
Угловые сварные соединения волноломов к передней, задней и боковым стенкам цистерны	136 ± 9	1,23	122 ± 8	1,36
Нахлесточные сварные соединения ребра жёсткости на боковых стенках цистерны	148 ± 10	1,15	91 ± 5	1,87

Проведенные исследования позволили разработать новые конструкторские решения для цистерн пожарных автомобилей, защищенные патентом Республики Беларусь [15].

Проведение подробного анализа результатов компьютерного моделирования ещё на стадии проектирования позволяет оценить и спрогнозировать состояние расчётной конструкции в зависимости от различных режимов эксплуатации, а также даёт возможность разрабатывать необходимые конструкционные изменения. Используемый методологический подход адаптивного компьютерного моделирования, основанный на научно обоснованных подходах к прогнозированию состояния конструкций пожарных автоцистерн, может быть использован для решения задач по повышению эксплуатационной надёжности различных ёмкостей для перевозки жидкости.

Заключение. По полученным результатам проведённых исследований можно сделать следующие *выводы*:

- анализ применяемой аварийно-спасательной техники на территории Республики Беларусь и её технического состояния позволил установить, что основной технической единицей в привлечении к ликвидации чрезвычайных ситуаций является пожарная автоцистерна, а одной из встречающихся причин её ремонта и вывода из боевого расчёта – нарушение герметичности цистерны для жидкости;

- при расчёте в программном комплексе ANSYS установлены зависимости влияния размерного фактора конструкционных элементов цистерн ПА объёмом 5 м³ на шасси МАЗ-5337 на напряженно-деформированное состояние;

- проведены прочностные расчёты цистерны объёмом 5 м³ пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337, на основе которых определены оптимальные размеры составляющих конструкционных элементов, что позволило разработать рекомендации для модернизации данной цистерны;

- внедрение и практическая комплексная реализация данных рекомендаций позволила повысить эксплуатационную надёжность конструкции цистерны на более чем 30%, увеличив тем самым её межремонтный период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казябо, В.А. Концепция оснащения подразделений по чрезвычайным ситуациям пожарной аварийно-спасательной техникой / В.А. Казябо, Ю.И. Шавель, И.Н. Гончаров ; НИИ ПБ и ПЧС // Сборник отчётов о НИР. – С. 4–9.
2. Короткевич, С.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун // Вестн. Воронеж. ин-та ГПС МЧС России. – 2017. – № 4 (25). – С. 45–51.
3. Беспалько, С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / С.В. Беспалько. – М., 2000. – 427 с.
4. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – Минск : Вышш. школа, 1993. – 512 с.

5. Методика динамического моделирования напряжённо-деформированного состояния элементов и узлов конструкций оболочечного типа. – Гомель : ГФ УГЗ МЧС Респ. Беларусь, 2017. – 8 с.
6. Короткевич, С.Г. Компьютерное моделирование и исследование напряжённо-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун, В.А. Жаранов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – № 1. – С. 81–90.
7. Короткевич, С.Г. Прогнозирование эксплуатационной надёжности пожарных автоцистерн с применением подходов компьютерного моделирования / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун // Горение и проблемы тушения пожаров : материалы междунар. науч.-практ. конф., Москва, 5 июля 2017 г. : в 2 ч. – М. : ВНИИПО, 2017. – Ч. 2. – С. 437–439.
8. Пояркова, К.В. Оценка дефектности структуры сварных соединений по наличию неметаллических включений / К.В. Пояркова, И.Р. Кузеев, К.Л. Забелин // Машиностроение : сетевой электрон. науч. журн. – 2017. – № 2 (5). – С. 32–35.
9. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов : справочник / В.И. Мяченков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 520 с.
10. Хренов, К.К. Сварка, резка и пайка металлов. Справочник. – М., 2013. – 385 с.
11. Бенерджи, П.В. Методы граничных элементов в прикладных науках / П.В. Бенерджи, Р.И. Баттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 494 с.
12. Детали машин в примерах и задачах : учеб. пособие / С.Н. Ничипорчик, М.И. Корженцевский, В.Ф. Калачёв ; под ред. С.Н. Ничипорчик. – 2-е изд. – М. : Высш. школа, 1981. – 186 с.
13. Воропай, В.С. Экспериментальные исследования технического состояния вагонов-цистерн / В.С. Воропай // Сборник научных работ ДонИЖТ. – 2010. – № 23. – С. 76–85.
14. Головченко, В.И. Проверка прочности элементов крепления цистерны к шасси автотопливозаправщика от смещения при действии продольной нагрузки / В.И. Головченко, Н.Л. Иванина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 1 (975). – С. 22–35.
15. Пожарная цистерна : решение от 18.05.2018 о выдаче патента по заявке ВУ № и 20180041 на полезную модель / В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич, В.Н. Пасовец ; заявитель Университет гражданской защиты МЧС Беларуси ; заявл. 12.02.2018.

Поступила 01.11.2018

**OPERATIONAL SAFETY OF FIRE TRUCK'S TANK :
MODERNIZATION OF STEEL STRUCTURES FOR THE PURPOSE
OF MECHANICAL CHARACTERISTICS MAINTENANCE**

S. KOROTKEVICH, V. KOVTUN

A fire truck is the main technical unit engaged in emergency recovery. It was established on the analysis basis of the of the emergency rescue equipment use in the territory of the Republic of Belarus. In the majority of cases the reason for fire truck's repair and decommissioning is pressurisation leakage. With the use of adaptive computer modelling approaches, the studies of the stress-strain state were carried out and the strength properties of the tank design of a fire engine were evaluated. In order to optimise the existing construction design according to the criterion of the safety factor, the design calculations have been made. On the basis of mentioned above calculations, the recommendations for the tank design upgrading have been developed. Its purpose is to improve the operational reliability and to enhance the maintenance time between repairs.

Keywords: fire truck, tank, deformation, computer simulation, design, welded joint, safety factor.