

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-1.39>

УДК 614.846.63:681.586.7

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИСТЕРН ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ

Ковтун В.А., Короткевич С.Г., Пасовец В.Н.

Цель. Экспериментальное подтверждение эффективности применения разработанных методик и рекомендаций, обеспечивающих повышение эксплуатационного ресурса, увеличение запаса прочности и межремонтного периода модернизированных цистерн пожарных автомобилей, эксплуатируемых в аварийно-спасательных подразделениях на территории Республики Беларусь.

Методы. Компьютерное моделирование, методы тензометрии.

Результаты. Экспериментальным путем исследовано напряженное состояние серийно изготавливаемой и модернизированной цистерны пожарного автомобиля при различных эксплуатационных режимах движения. Подтверждены результаты теоретических расчетов, полученные методом компьютерного моделирования. В статье представлено описание эксперимента, обработка и анализ полученных результатов.

Область применения исследований. Результаты исследований применены при проектировании и разработке конструкций оболочечного типа.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, цистерна, модернизация, деформация, механические напряжения, тензорезистивный датчик, сварное соединение, ребро жесткости.

(Поступила в редакцию 16 января 2020 г.)

Введение

Пожарные автоцистерны являются основной технической единицей, осуществляющей доставку пожарных-спасателей и огнетушащих веществ к месту чрезвычайной ситуации. Движение техники нередко происходит при отсутствии ровного дорожного покрытия¹. При этом конструкция цистерны воспринимает значительные гидродинамические нагрузки, создаваемые движением жидкости. В результате одной из основных причин выхода из строя пожарных автомобилей является нарушение герметичности цистерны из-за образования трещин в местах сварных соединений элементов конструкции. Устранение данных повреждений цистерны требует проведения большого объема подготовительных и ремонтных работ, что снижает боевую готовность аварийно-спасательных подразделений. Один из путей решения данной проблемы – научно-обоснованное проектирование конструкций цистерн пожарных автомобилей, что является сложной технической задачей.

В целях решения поставленной задачи авторским коллективом был разработан новый методологический подход², заключающийся в разработке компьютерных моделей, базирующихся на экспериментальных данных, полученных с использованием вибродиагностического комплекса, что позволяет проводить исследования и оценку напряженно-деформированного состояния различных конструкций оболочечного типа с учетом эксплуатационных режимов движения и рельефа местности. Для проведения исследований выбраны наиболее распространенные на территории Республики Беларусь и уже вышедшие из гарантийного периода обслуживания пожарные аварийно-спасательные автомобили с объемом цистерны 5 м³ на шасси МАЗ-5337. Конструкция цистерны данных автомобилей представляет собой емкость прямоугольного сечения, образованного передней, задней, боковыми, верхней

¹ Сведения о чрезвычайных ситуациях [Электронный ресурс] / МЧС Республики Беларусь. – 2019. – Режим доступа: <https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs> – Дата доступа: 16.09.2019.

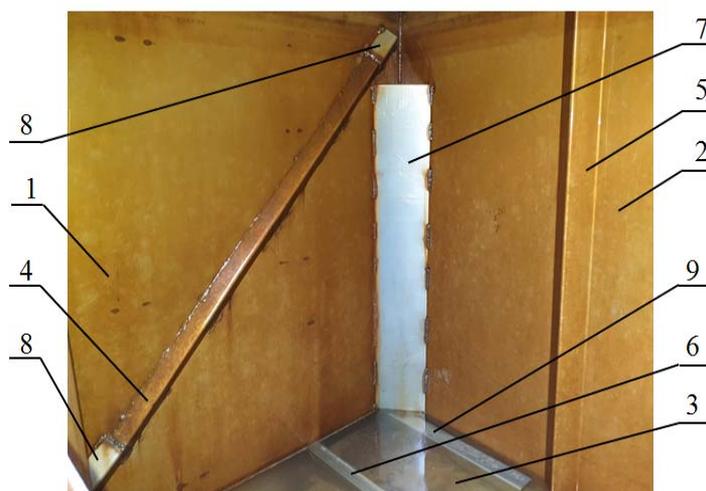
² Методика динамического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструкций оболочечного типа. – Гомель: ГФ УГЗ МЧС РБ, 2017. – 10 с. – 24.07.2017.

и нижней стенками. Внутри емкости расположены ребра жесткости, продольные и поперечные волноломы. В результате ранее проведенных исследований были разработаны рекомендации по модернизации данной цистерны пожарного автомобиля [1–5], комплексная реализация которых повышает запас прочности конструкции более чем на 30 %: установка косынки в виде полосы размером 900×150 мм в вертикальной плоскости под углом 45 градусов к находящимся в контакте стенкам; увеличение длины ребер жесткости в виде уголка на боковых стенках цистерны с 700 мм (заводское исполнение) до его максимальной величины 1200 мм; установка дополнительных П-образных профилей толщиной 3 мм при геометрических размерах $50 \times 50 \times 50$ мм в нижней части передней и задней стенок, находящихся в контакте с дном.

Цель работы состояла в экспериментальном подтверждении эффективности применения разработанных методик и рекомендаций, обеспечивающих повышение эксплуатационного ресурса, увеличение запаса прочности и межремонтного периода модернизированных цистерн пожарных автомобилей, эксплуатируемых в аварийно-спасательных подразделениях на территории Республики Беларусь.

Основная часть

Методика исследований. Определение напряженно-деформированного состояния технических конструкций является основой для определения их работоспособности, безопасной эксплуатации и оценки остаточного ресурса. Для данных целей применяют датчики, которые преобразуют входное воздействие любой физической величины в сигнал, удобный для дальнейшего использования. Тензометрические датчики предназначены для измерения упругих деформаций материалов и конструкций при статических и динамических нагрузках, а также для измерения сил, давлений и перемещений. Среди электронных тензометрических датчиков наибольшее распространение получили тензорезистивные датчики [6]. Экспериментальные исследования проводились на серийно изготавливаемой и модернизированной цистерне объемом 5 м^3 пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 при помощи измерительного тензометрического комплекса. На рисунке 1 представлен фрагмент углового сварного соединения боковой и передней стенок модернизированной цистерны пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337, на котором отражена реализация разработанных рекомендаций.



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

Рисунок 1. – Фрагмент внутреннего углового сварного соединения боковой и передней стенок цистерны

Тензометрический комплекс состоял из портативного компьютера с установленным специальным программным обеспечением, приемного устройства и тензометрических датчиков (рис. 2). В качестве приемного устройства применялся портативный прецизионный прибор модели «MT-D4». Он предназначен для цифровой обработки сигналов, передаваемых от подключенных к нему тензометрических датчиков. Для управления прибором «MT-D4» и отображения результатов измерений используется персональный компьютер на базе MS Windows с установленным специальным программным обеспечением³. Для измерений механических напряжений применялись линейные тензорезистивные датчики общего назначения маркировки «CEA-06-250UW-120»⁴. Датчик состоит из фольговой ленты толщиной до 12 мкм, подложки и контактов с внешними выводами⁵. Принцип действия основан на тензорезистивном эффекте – свойстве проводников и полупроводников изменять электрическое сопротивление при объемном или линейном деформировании⁶. Фольговый чувствительный элемент выполнен из константанового сплава в термокомпенсационной оболочке. Основа подложки датчика выполнена из полиамида. Данный вид тензорезисторов способен измерять напряжение в статическом и динамическом режимах, обладает малым сопротивлением $120 \pm 0,3 \text{ } \Omega$, имеет возможность измерять деформации в диапазоне $\pm 5 \%$, применяется в температурном диапазоне от -75 до $+175 \text{ } ^\circ\text{C}$.



1 – тензометрические датчики; 2 – приемное устройство;
3 – портативный компьютер с установленным программным обеспечением

Рисунок 2. – Расположение измерительного комплекса на пожарном автомобиле

Установка измерительных датчиков проводилась в отопляемом помещении на предварительно очищенную поверхность наружных стенок цистерны. Контрольными местами были определены области сварных соединений цистерны [2], которые подвержены в процессе эксплуатации наибольшим нагрузкам и были усилены в ходе проведенных работ по модернизации. Поверхность, на которую крепились датчики, обладала шероховатостью не более $400 \text{ } \mu\text{m}$ ⁷. Температурная компенсация датчикам при температуре помещения $+22 \text{ } ^\circ\text{C}$ не требовалась [7].

³ D4 Data Acquisition Conditioner [Электронный ресурс] / Micro-measurements. – Режим доступа: <https://micro-measurements.com/instruments> – Дата доступа: 23.07.2019.

⁴ VPG Disclaimer [Электронный ресурс] / Micro-measurements. – Режим доступа: <http://www.vishaypg.com/docs/11312/250uw.pdf> – Дата доступа: 23.07.2019.

⁵ Тензодатчик: виды, принцип работы и устройство [Электронный ресурс] / ASUTPP. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/tenzodatchik.html> – Дата доступа: 23.07.2019.

⁶ Тензорезисторы. Термины и определения: ГОСТ 20420-75. – Введ. 01.01.1976 г. – М.: Гос. ком-т стандартов Сов. Министров СССР, 1975. – 15 с.

⁷ Тензорезисторы. Общие технические условия: ГОСТ 21616-91. – Введ. 01.01.1992 г. – М.: Гос. ком-т по стандартизации и метрологии СССР, 1997. – 49 с.

Выбраны следующие эксплуатационные режимы пожарного автомобиля, приближенные к условиям его оперативного движения: режим 1 – движение по прямому участку ровной асфальтированной дороги со скоростью 50 км/ч; режим 2 – движение по дороге с неровностями со скоростью 20–30 км/ч; режим 3 – выезд с разворотом со скоростью 10–15 км/ч; режим 4 – ускорение с места до скорости 30 км/ч и торможение.

Проведение исследований. Первоначально исследования были проведены на серийно изготавливаемой цистерне объемом 5 м³ пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337. В таблице 1 отражены сведения о контролируемых областях конструкции цистерны, количестве датчиков и способах их размещения.

Таблица 1. – Расположение тензометрических датчиков на стенках серийно изготавливаемой конструкции цистерны пожарного автомобиля

Области установки тензометрических датчиков на стенках цистерны	Расположение тензометрических датчиков на поверхности стенок цистерны		
	горизонтально	вертикально	под углом 45°
Угловое сварное соединение передней и боковой стенки	№ 1	№ 2	№ 3
Торцевое сварное соединение волнолома и боковой стенки	№ 4	№ 5	№ 6
Нахлесточное сварное соединение ребра жесткости и боковой стенки	№ 7	–	–
Угловое сварное соединение передней стенки и дна	№ 8	–	–

В целях точного определения направления деформации с учетом возможностей приемного устройства было использовано 8 датчиков, которые устанавливались на поверхности стенок цистерны горизонтально, вертикально и под углом 45° в наиболее подверженных нагрузкам областях конструкции (рис. 3).

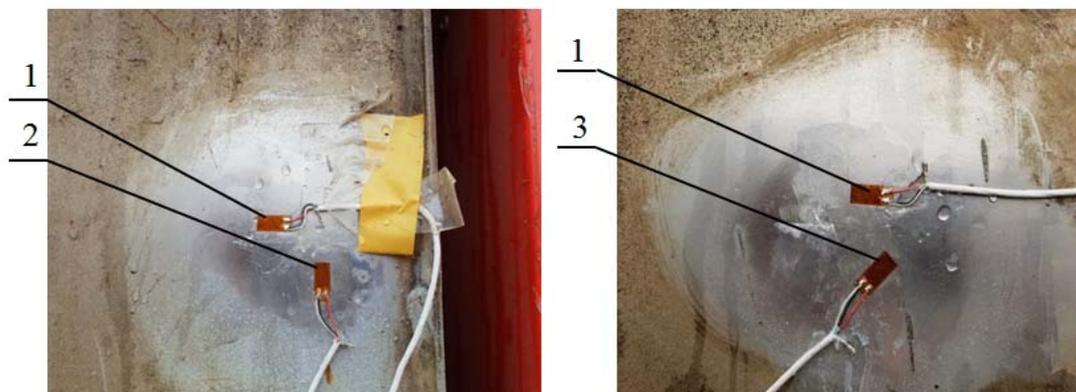


Рисунок 3. – Расположение тензометрических датчиков на поверхности стенок цистерны пожарного автомобиля: 1 – горизонтально; 2 – вертикально; 3 – под углом 45°

Исследования проводились при движении пожарного автомобиля в установленных эксплуатационных режимах. На рисунке 4 представлены максимальные значения механических напряжений, возникающих в конструкции серийно изготавливаемой цистерны.

Из рисунка 4 видно, что максимальные напряжения в конструкции цистерны пожарного автомобиля возникают при движении в эксплуатационном режиме 2, что соответствует движению по дороге с неровностями со скоростью 20–30 км/ч. Проведенные испытания показали, что датчики № 1, 4, 7, 8, установленные горизонтально, фиксируют наибольшие механические напряжения. Это свидетельствует о точном определении направления возникающих напряжений в конструкции цистерны.

Испытания модернизированной конструкции цистерны объемом 5 м³ пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 проведены при аналогичных эксплуатационных режимах дви-

жения. На основании полученных результатов исследований серийно изготавливаемой конструкции датчики на стенках модернизированной цистерны размещались горизонтально: датчик № 9 – угловое сварное соединение передней и боковой правой стенки; датчик № 10 – торцевое сварное соединение волнолома и боковой правой стенки; датчик № 11 – нахлесточное сварное соединение ребра жесткости и боковой правой стенки; датчик № 12 – угловое сварное соединение передней стенки и дна. Максимальные значения механических напряжений представлены на рисунке 5.

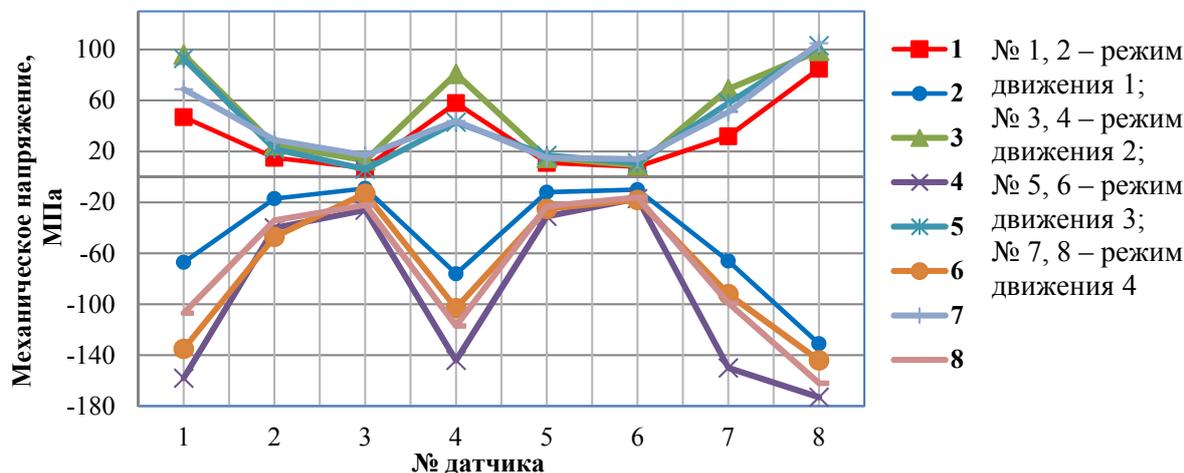


Рисунок 4. – Максимальные значения механического напряжения в конструкции серийно изготавливаемой цистерны при различных режимах движения пожарного автомобиля

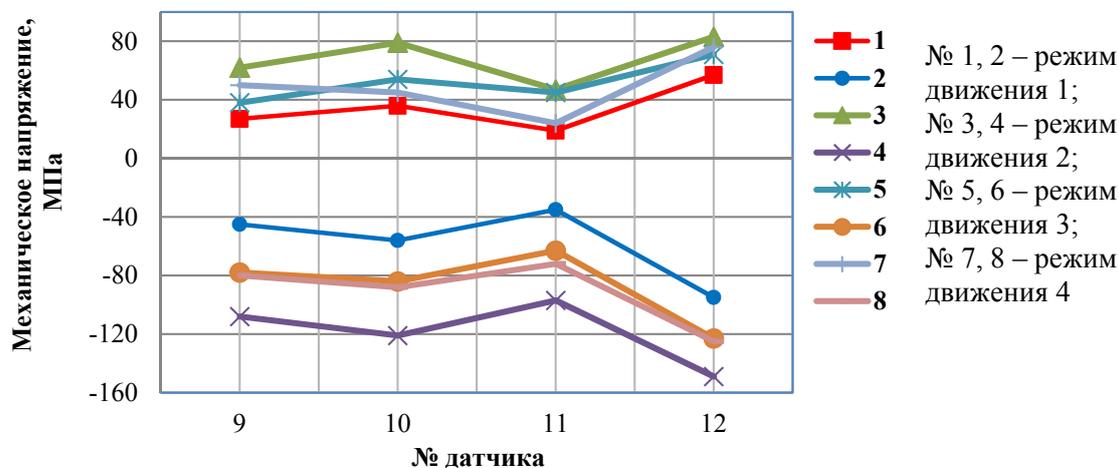


Рисунок 5. – Максимальные значения механического напряжения в модернизированной конструкции цистерны при различных режимах движения пожарного автомобиля

Анализ результатов проведенных исследований на модернизированной цистерне позволил установить, что максимальные напряжения также возникают при движении пожарного автомобиля по дороге с неровностями со скоростью 20–30 км/ч.

На рисунках 6 и 7 представлены результаты измерений механических напряжений датчиком № 1, который устанавливался в области углового сварного соединения передней и боковой стенок серийно изготавливаемой и модернизированной цистерны объемом 5 м³ пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337. Программное обеспечение фиксировало возникающие напряжения при частоте опроса датчиков $v = 0,25$ с.

Согласно рисунку 6 исследуемые эксплуатационные режимы движения пожарного автомобиля соответствуют следующим временным интервалам: режим 1 (1–141 с); режим 2 (460–520 с); режим 3 (141–190 с; 271–309 с); режим 4 (680–710 с; 750–780 с).

Эксплуатационные режимы движения пожарного автомобиля с модернизированной цистерной соответствуют следующим временным интервалам (рис. 7): режим 1 (310–500 с); режим 2 (680–760 с); режим 3 (100–120 с; 140–190 с); режим 4 (520–610 с).

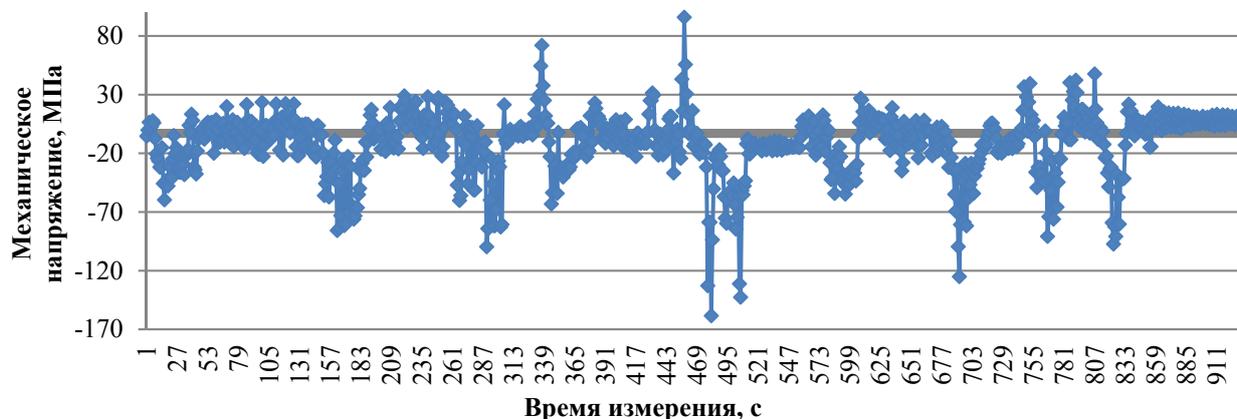


Рисунок 6. – Результаты измерений механического напряжения, зафиксированных датчиком № 1 на конструкции серийно выпускаемой цистерны при движении пожарного автомобиля

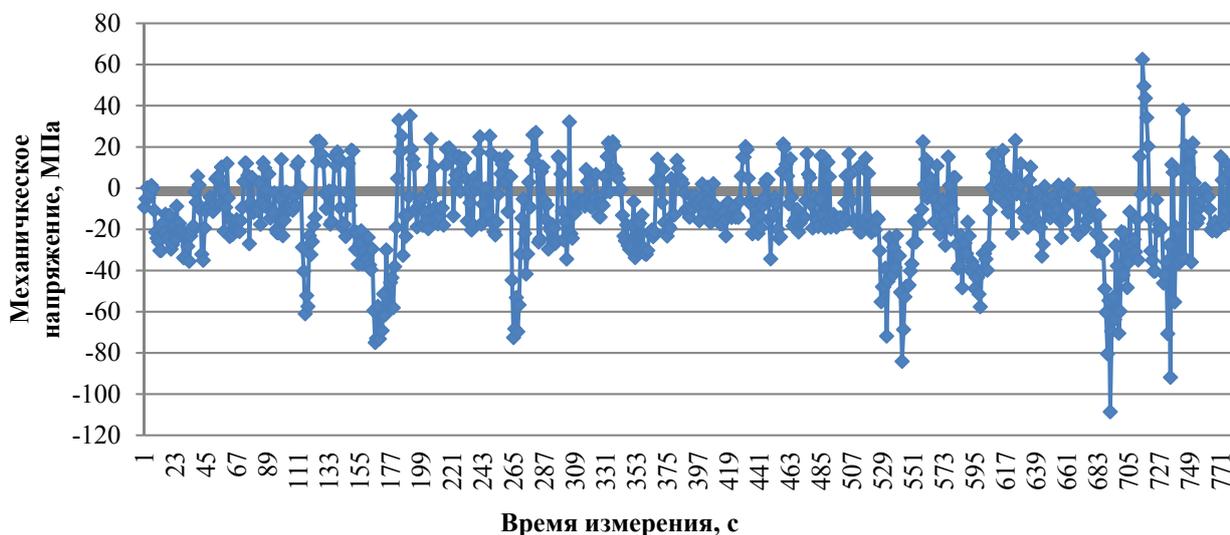


Рисунок 7. – Результаты измерений механического напряжения, зафиксированных датчиком № 9 на конструкции модернизированной цистерны при движении пожарного автомобиля

Анализ полученных данных показал значительное снижение максимальных напряжений при всех эксплуатационных режимах движения пожарного автомобиля. В таблице 2 представлены значения максимальных напряжений, полученные тензометрическим комплексом в результате испытаний серийно изготавливаемой и модернизированной цистерны объемом 5 м³ пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337.

Таблица 2. – Результаты экспериментальных измерений механических напряжений на поверхности стенок серийно выпускаемой и модернизированной цистерны пожарных автомобилей

Области сварных соединений	Результаты тензометрических исследований	
	серийно выпускаемая цистерна σ_{\max} , МПа	модернизированная цистерна σ_{\max} , МПа
Угловое сварное соединение передней и боковой стенки	158	108
Торцевое сварное соединение волнолома и боковой стенки	145	121
Нахлесточное сварное соединение ребра жесткости и боковой стенки	150	97
Угловое сварное соединение передней стенки и дна	173	149

Натурные испытания свидетельствуют, что комплексная практическая реализация разработанных рекомендаций по модернизации цистерн объемом 5 м³ пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 позволяет повысить запас прочности более чем на 30 % и, следовательно, увеличить межремонтный период.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования напряженного состояния серийно изготавливаемой и модернизированной цистерны пожарных автомобилей объемом 5 м³ на базе шасси МАЗ-5337 при различных эксплуатационных режимах движения. Анализ результатов исследований позволил установить, что при движении пожарного аварийно-спасательного автомобиля напряженное состояние цистерны в значительной мере определяется геометрическими параметрами элементов ее конструкции. В работе показана возможность модернизации эксплуатируемых конструкций автоцистерн. Установлено, что применение дополнительных упрочняющих элементов позволяет повысить запас прочности автоцистерны более чем на 30 %.

Сравнительный анализ результатов натурных испытаний и исследований напряженно-деформированного состояния методом 3D компьютерного моделирования показал высокую степень корреляции, при этом расхождение значений максимальных напряжений не превышает 6–9 %.

Полученные результаты подтверждают эффективность модернизации пожарных аварийно-спасательных автомобилей на базе шасси МАЗ-5337 и позволяют рекомендовать разработку к внедрению в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям при проведении капитального ремонта эксплуатируемых автоцистерн.

ЛИТЕРАТУРА

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. 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 гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 81–90. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.81.
3. 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. 97–101.
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 [и др.] // Вестник Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 38–45. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-1.38.
5. 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.
6. Мехеда, В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во «Самара», гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
7. Ахмеджанов, Р.А. Физические основы получения информации: учеб. пособие / Р.А. Ахмеджанов, А.И. Чередов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 184 с.

Тензометрические исследования напряженного состояния цистерн пожарных автомобилей при различных режимах движения

Tenzometric research of stress state of fire truck tanks at various motion modes

Ковтун Вадим Анатольевич

доктор технических наук, профессор

Гомельский филиал государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра оперативно-тактической деятельности и техники, профессор

Адрес: ш. Речицкое, 65А,
246023, г. Гомель, Беларусь

e-mail: vadimkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9510-132X

Vadim A. Kovtun

Grand PhD in technical sciences, Professor

Gomel Branch of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Operational-tactical Activity and Technical Equipment, Professor

Address: sh. Rechitskoe, 65A,
246023, Gomel, Belarus

e-mail: vadimkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9510-132X

Короткевич Сергей Геннадьевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: korotkevichsergei@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9388-0881

Sergey G. Korotkevich

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Industrial Safety, Lecturer

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: korotkevichsergei@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9388-0881

Пасовец Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: pasovets_v@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9451-9513

Vladimir N. Pasovets

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Industrial Safety, Associate Professor

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: pasovets_v@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9451-9513

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-1.39>

TENZOMETRIC RESEARCH OF STRESS STATE OF FIRE TRUCK TANKS AT VARIOUS MOTION MODES

Kovtun V.A., Korotkevich S.G., Pasovets V.N.

Purpose. Experimental confirmation of application effectiveness of developed methods and recommendations, ensuring increasing the maintenance period as well as safety margin and overhaul period of modernized fire truck tanks, operating in the emergency rescue units on the territory of the Republic of Belarus.

Methods. Computer modeling, tensometric methods.

Findings. The stress state of a quantity-built and modernized fire engine tank under various operational driving conditions were studied in an experimental way. The results of theoretical calculations obtained by computer simulation method are confirmed. The experiment, processing and analysis of the results are presented.

Application field of research. The research results were applied in the design and development of shell-type structures.

Keywords: fire truck, tank, modernization, deformation, mechanical stress, strain gauge, welded joint, stiffener.

(The date of submitting: January 16, 2019)

REFERENCE

1. Korotkevich S.G., Kovtun V.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy tsistern pozharnykh avtomobiley [The research of strain-stress state of fire apparatus tanks construction]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii*, 2017. Vol. 25, No 4. Pp. 45–51. (rus)
2. Kovtun V.A., Korotkevich S.G., Zharanov V.A. Komp'yuternoe modelirovanie i issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy tsistern pozharnykh avtomobiley [Computer simulation and research of the stress-strain state of fire tank truck construction]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No 1. Pp. 81–90. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.81.
3. Korotkevich S.G., Kovtun V.A. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' tsistern pozharnykh avtomobiley: modernizatsiya stal'nykh konstruktsiy v tselyakh povysheniya ikh mekhanicheskikh kharakteristik [Operational safety of fire truck's tank: modernization of steel structures for the purpose of mechanical characteristics maintenance]. *Vestnik PGU. Seriya B*, 2019. No 3. Pp. 97–101. (rus)
4. Kovtun V.A., Korotkevich S.G., Pasovets V.N., Todorov I. Optimizatsiya konstruktsii tsisterny pozharnogo avtomobilya ATs-5.0-50/4 na baze shassi MAZ-5337 metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Operational safety improvement of the fire truck's tank AC-5.0-50/4 based on the chassis MAZ-5337 by the method computer modeling]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No 1. Pp. 38–45. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-1.38.
5. Kovtun V., Korotkevich S., Mirchev Y., Lodnya V. Optimization of fire truck's tanks on the chassis MAZ-6317 by the method of computer simulation. *International Journal «NDT Days»*, 2019. Vol. II, iss. 4. Pp. 495–500.
6. Mekheda V.A. *Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsiy* [Strain-strain method for measuring strain]: manual. Samara: Izdatel'stvo Samara, Samara National Research University, 2011. 56 p. (rus)
7. Akhmedzhanov R.A., Cheredov A.I. *Fizicheskie osnovy polucheniya informatsii* [Physical basics of getting information]: tutorial. Omsk: Izdatel'stvo Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008. 184 p. (rus)