

УДК 614.846.63:004.94

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЦИСТЕРН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЖАРНОГО АВТОМОБИЛЯ

В. А. КОВТУН

*Гомельский филиал Государственного учреждения
образования «Университет гражданской защиты
МЧС Беларуси»*

С. Г. КОРОТКЕВИЧ

*Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС Беларуси»,
г. Минск*

В. А. ЛОДНЯ

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель*

С применением возможностей компьютерного 3D моделирования и тензометрического комплекса проведен комплекс исследований по установлению характерных напряжений, возникающих в угловых сварных соединениях цистерны пожарного автомобиля при движении. Приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния цистерны пожарного автомобиля. Представлен анализ распределения полей напряжений в тех областях цистерны, которые наиболее подвержены появлению течи в процессе эксплуатации. Экспериментальным путем исследовано напряженное состояние серийной и модернизированной цистерны пожарного автомобиля при различных эксплуатационных режимах движения. Подтверждены результаты расчетов, полученные с использованием компьютерного моделирования.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, цистерна, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование, модернизация, угловое сварное соединение.

FORMATION FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF TANK CORNER JOINTS DURING THE FIRE TRUCK MOVEMENT

V. A. KOVTUN

*Gomel Branch of the State Educational Institution
“University of Civil Protection of the MES of Belarus”*

S. G. KOROTKEVICH

*State Educational Institution “University of Civil Protection
of the MES of Belarus”, Minsk*

V. A. LODNYA

*Educational Institution “Belarusian State University
of Transport”, Gomel*

Using the capabilities of computer 3D simulation and the strain-measuring complex, a series of studies has been carried out to establish the characteristic stresses arising in the corner joints of a fire truck tank during its movement. The calculation results of the stress-strain state of a fire truck tank are presented. The analysis of stress field distribution is carried out in those tank areas which are most susceptible to leakage during operation. The stress state of a serial and modernized fire truck tank has been experimentally studied under various operational motion modes. The calculation results obtained by using computer simulation are confirmed.

Keywords: fire truck, tank, stress-strain state, computer simulation, modernization, corner joint.

Введение

При производстве пожарных автоцистерн широкое распространение получили конструкции чемоданного сечения, применение которых позволило увеличить полезный объем емкости цистерны. В процессе эксплуатации цистерны пожарных автомобилей подвергаются значительным повторно-переменным нагрузкам, в том числе за счет изменения характера перемещения жидкости относительно резервуара в условиях оперативного следования автомобиля в режимах разгона и торможения, а также при движении по пересеченной местности. Для данных условий работы требуется обеспечить долговечность, безопасность и надежность конструкции, в связи с чем к металлу как к основному конструкционному материалу предъявляются повышенные требования.

Важнейшей задачей инженерного расчета является оценка прочности конструкции по известному напряженному состоянию. Сравнительный анализ напряженных состояний для заданного материала можно выполнять по эквивалентным напряжениям. Если известно предельное напряженное состояние, то расчет на прочность сводится к определению напряженного состояния в опасной точке (или всех потенциально опасных точках) исследуемого тела и сравнению его с предельным. Объемное напряженное состояние в точке полностью определяется тремя главными напряжениями. В настоящее время для решения широкого круга инженерных задач используются расчетные программные комплексы ANSYS, COMSOL Multiphysics и др. Для расчета изотропных материалов, в частности, металлов, у которых наблюдается вязкое разрушение, момент наступления пластических деформаций определяется эквивалентными напряжениями по Мизесу [1], связанными с главными напряжениями следующим образом:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (1)$$

где σ_e – эквивалентные напряжения по Мизесу; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

При расчете цистерн основной задачей является снижение материалоемкости стальных конструкций без уменьшения несущей способности. При этом конструкционная сталь должна соответствовать высоким прочностным характеристикам при достаточной пластичности материала, а также обладать коррозионной устойчивостью. Как известно, для металлов до определенного момента соблюдается линейная связь между деформацией и напряжением [1]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2)$$

где ε – деформация; σ – напряжение; E – модуль упругости.

На начальной стадии нагружения цистерны происходят упругие деформации, так как удлинение материала растет прямо пропорционально величине нагрузки, а при дальнейшем увеличении нагрузки наступает переход в область пластических деформаций и зависимость (2) не соблюдается. В большинстве случаев материал детали испытывает сложнопластическое состояние. В том случае, если величина одного компонента тензора

напряжений существенно превосходит другие, оценку нагруженности при сложном напряженно-деформированном состоянии проводят аналогично, как и при случае одноосного напряженного состояния. При этом за расчетное напряжение выбирается величина, которая позволяет наиболее точно охарактеризовать условия нагружения [2].

Опыт эксплуатации показывает, что одной из основных причин выхода из строя пожарных автомобилей является нарушение герметичности цистерн из-за образования трещин в местах угловых сварных соединений элементов конструкции.

Цель работы – исследование и анализ напряженно-деформированного состояния цистерн пожарных автомобилей при движении, а также определение областей в конструкции, где напряжения могут достигать предельно-допустимых значений.

Объект и методы исследований

Сравнительные исследования напряженно-деформированного состояния пожарной автоцистерны пятитонного водоизмещения на шасси МАЗ-5337 проводились как расчетным путем с применением подходов адаптивного 3D компьютерного моделирования, так и экспериментальным с применением измерительного тензометрического комплекса. Следует отметить, что объект исследований является одним из наиболее распространенных пожарных автомобилей на территории Республики Беларусь и по срокам эксплуатации уже вышедшим из гарантийного периода обслуживания. Конструкция цистерны данного автомобиля представляет собой емкость чешуеобразного сечения. Ее образуют передняя, задняя, боковые стенки, крыша и дно. Внутри расположены ребра жесткости, продольные и поперечные волноломы.

Для проведения исследований разработана методика динамического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструкций оболочечного типа. Ее отличительная особенность – возможность учета комплексного влияния геометрических и физических параметров конструктивных элементов цистерны, а также характера динамического воздействия жидкости на стенки и напряженно-деформированное состояние исследуемой конструкции, что позволяет прогнозировать ее прочностные характеристики в зависимости от условий эксплуатации [3], [4]. Для увеличения запаса прочности цистерны пожарного автомобиля были разработаны способы ее модернизации [5], [6].

Экспериментальное подтверждение эффективности применения разработанных методик и рекомендаций, обеспечивающих увеличение запаса прочности и межремонтного периода модернизированных цистерн пожарных автомобилей, осуществлено при помощи измерительного тензометрического комплекса, который состоит из портативного компьютера с установленным специальным программным обеспечением, приемного устройства и тензометрических датчиков. В качестве приемного устройства применялся портативный прецизионный прибор модели «MT-D4», предназначенный 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 обеспечением. Для измерений механических напряжений применялись линейные тензорезистивные датчики общего назначения маркировки «CEA-06-250UW-120».

Создание расчетных 3D моделей серийной и модернизированной цистерны объемом 5 м³ пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 в масштабе 1 : 1 проводилось в программном комплексе SolidWorks (рис. 1).

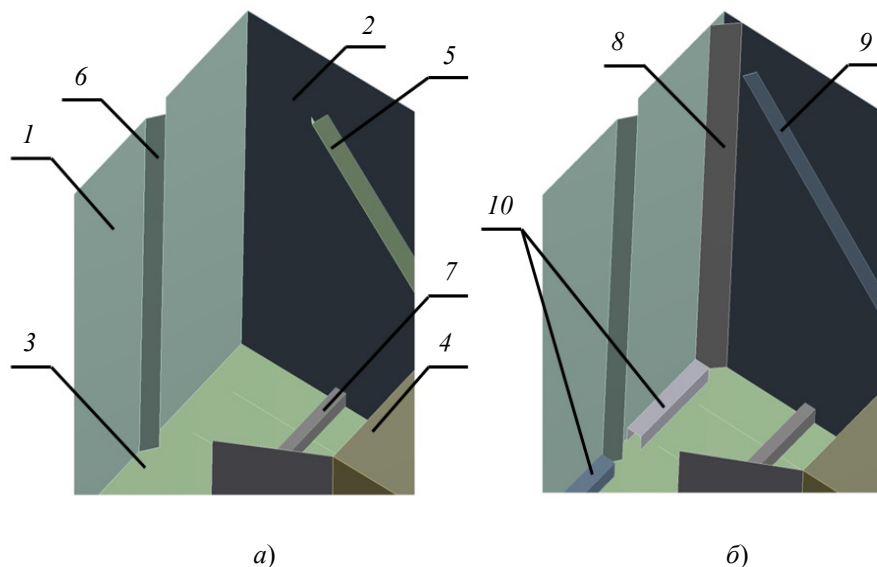


Рис. 1. Фрагменты расчетных 3D моделей серийной (а) и модернизированной (б) цистерн пожарного автомобиля (вид изнутри угловых сварных соединений передней, боковой стенки и дна): 1 – передняя стенка; 2 – боковая стенка; 3 – дно; 4 – поперечный волнолом; 5 – ребро жесткости на боковой стенке; 6 – ребро жесткости на передней стенке; 7 – П-образный профиль; 8 – косынка; 9 – удлиненное ребро жесткости на боковой стенке; 10 – дополнительный П-образный профиль

Стенки цистерны выполнены из листа металла толщиной 3 мм; а дно – толщиной 4 мм. Создание конечно-элементных моделей и расчет проводился в программном комплексе ANSYS. Для решения задач в области исследования напряженно-деформированного состояния конструкций оболочечного типа оптимальным решением формы элемента дискретизации был принят гексаэдр (метод Hex Dominant), что позволило ускорить процесс расчета, повысить его сходимости и устойчивость. Для связи элементов компьютерной модели использовался связанный (Bonded) контакт. Контактная задача решалась расширенным методом Лагранжа [7]. Построенная расчетная конечно-элементная модель серийной цистерны содержит 374849 узлов и 317603 элемента, а модернизированной – 392576 узлов и 335240 элементов. В расчете использованы следующие механические характеристики нержавеющей стали марки AISI 430 2B, которая применяется в производстве цистерны: модуль упругости $E = 206$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 7700$ кг/м³; предел текучести $\sigma_T = 205$ МПа; предел прочности $\sigma_n = 460$ МПа. Для моделирования заполнения цистерны водой в настройках «Hydrostatik pressure» учитывается гидростатическое давление на ее стенки с учетом направления вектора действующей силы при движении автомобиля и плотности жидкости (1000 кг/м³). В качестве граничных условий принято жесткое закрепление конструкции цистерны по нижней части лонжеронов [8]. В настройках «Acceleration» учитываются действующие силы инерции. Ранее проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что максимальное значение ускорения $a = 22,3$ м/с² возникает на поверхности боковых стенок цистерны при движении пожарного автомобиля по дороге с неровностями со скоростью 20–30 км/ч [3], а наибольшие напряжения возникают в области сварных соединений ее конструкции.

Результаты исследований и их обсуждение

Проведен сравнительный расчет напряженно-деформированного состояния серийной и модернизированной цистерны объемом 5 м³ пожарного автомобиля на

шасси МАЗ-5337. Основное внимание при расчете уделено эквивалентным напряжениям по Мизесу, наибольшим главным напряжениям, нормальным и касательным напряжениям. Расчетные значения характерных напряжений в угловых сварных соединениях серийной и модернизированной цистерны пожарного автомобиля приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета напряжений, возникающих в угловых сварных соединениях цистерн пожарного автомобиля

Вид напряжения	Серийная цистерна		Модернизированная цистерна	
	Угловое, соединяющее стенки цистерны	Угловое, соединяющее стенки цистерны и дно	Угловое, соединяющее стенки цистерны	Угловое, соединяющее стенки цистерны и дно
Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа	133÷145	147÷156	82÷93	115÷127
Наибольшие главные напряжения, МПа	155÷167	176÷184	109÷116	153÷164
Нормальные напряжения по оси Y, МПа	147÷156	162÷171	95÷102	142÷153
Касательные напряжения по оси XZ, МПа	22÷27	32÷39	14÷19	21÷25

Анализ распределения полей напряжений позволил установить значительное снижение значений во всех контрольных областях модернизированной цистерны в сравнении с серийной цистерной пожарного автомобиля (рис. 2).

Результаты исследований показали, что наибольшие значения главных и нормальных напряжений наблюдаются в областях угловых сварных соединений передней, боковой стенок и дна цистерны. Причем величина данных напряжений возрастает по мере приближения к месту непосредственного расположения сварного шва. Анализ моделей распределения полей нормальных напряжений позволил установить, что наибольшие напряжения возникают в угловых сварных соединениях стенок цистерны пожарного автомобиля по оси Y. При этом полученные значения нормальных напряжений по оси Y превышают на 5–12 % напряжения по оси X. Также определено, что значения возникающих касательных напряжений имеют значительно меньшую величину по сравнению с остальными, а область их распространения небольшим участком по оси XZ затрагивает рассматриваемые угловые соединения. Это свидетельствует о том, что значительное влияние на формирование напряженно-деформированного состояния оказывают растягивающие напряжения. Следует отметить, что растягивающие напряжения являются одним из источников возникновения и развития трещин в сварных соединениях, что в дальнейшем может приводить к их разрушению.

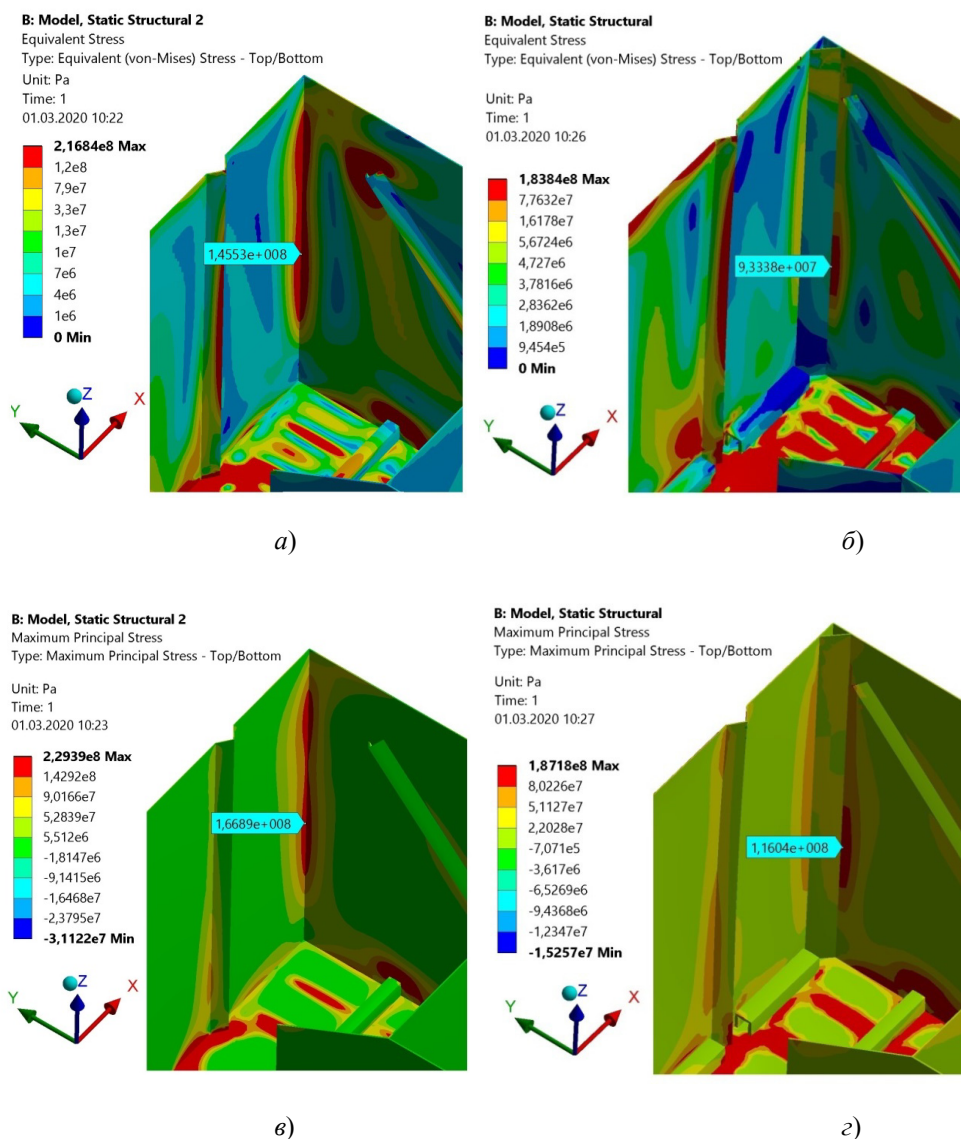


Рис. 2. Фрагменты 3D моделей распределения полей напряжений серийной (а, в) и модернизированной (б, г) цистерны пожарного автомобиля (вид изнутри угловых сварных соединений передней, боковой стенок и дна): а, б – модели распределения полей эквивалентных напряжений по Мизесу; в, г – модели распределения полей наибольших главных напряжения

Тензометрические испытания серийной и модернизированной цистерны объемом 5 м³ проводились в соответствии с утвержденной программой и метрологическими требованиями при различных эксплуатационных режимах движения пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337: 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. В табл. 2 отражены сведения о контролируемых областях серийной цистерны, количестве датчиков и их расположении. В целях точного определения направления деформации было использовано 8 датчиков, которые устанавливались на наружной поверхности стенок цистерны (рис. 3) горизонтально, вертикально и под углом 45° [9]. Выбор контрольных областей осуществлялся на основании результатов компьютерного моделирования.

Таблица 2

Расположение тензорезисторов на наружной поверхности стенок серийной цистерны пожарного автомобиля

Области установки датчиков		Способ расположения датчиков		
		горизонтально	вертикально	под углом 45°
Угловое сварное соединение передней и боковой стенки	А	№ 1	№ 5	–
	Б	№ 2	–	№ 7
Угловое сварное соединение передней стенки и дна	В	№ 3	№ 6	–
	Г	№ 4	–	№ 8

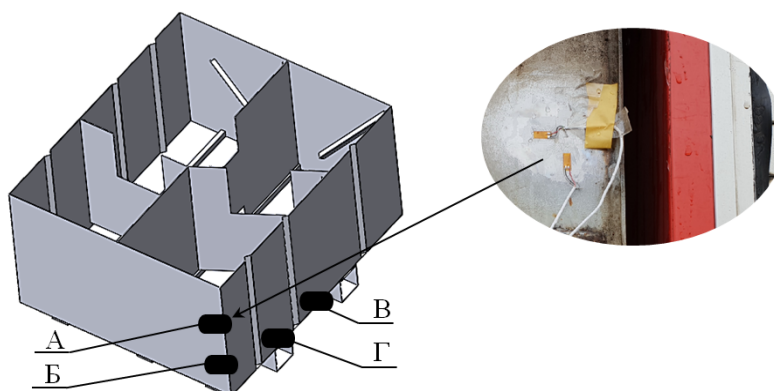


Рис. 3. Схема установки тензорезистивных датчиков на наружной поверхности стенок цистерны пожарного автомобиля: область А, Б – угловое сварное соединение передней и боковой стенки; область В, Г – угловое сварное соединение передней стенки и дна

На рис. 4 даны максимальные значения механических напряжений, которые зафиксированы в процессе испытаний серийной конструкции цистерны. При этом для каждого режима движения пожарного автомобиля показаны максимальные сжимающие (зависимость 1, 3, 5, 7) и растягивающие (зависимость 2, 4, 6, 8) механические напряжения на исследуемой поверхности материала конструкции.

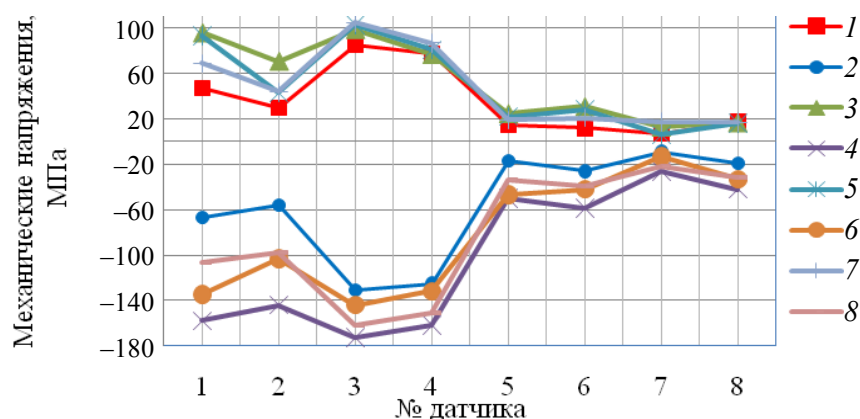


Рис. 4. Зависимость возникающих напряжений в конструкции серийной цистерны при различных режимах движения пожарного автомобиля:
 1, 2 – режим движения № 1; 3, 4 – режим движения № 2;
 5, 6 – режим движения № 3; 7, 8 – режим движения № 4

Испытания показали, что датчики № 1–4, которые были установлены горизонтально, фиксируют наибольшие значения механических напряжений. Это свидетельствует о точном определении направления распространения возникающих напряжений в конструкции цистерны. Испытания модернизированной цистерны пожарного автомобиля проведены в аналогичных условиях, результаты измерений представлены на рис. 5. Исходя из полученных результатов измерения напряжений на серийной цистерне, датчики № 9–12 на модернизированной цистерне устанавливались горизонтально. На основании результатов испытаний было определено, что при эксплуатационном режиме № 2 в конструкции модернизированной цистерны зафиксированы максимальные значения растягивающих напряжений.

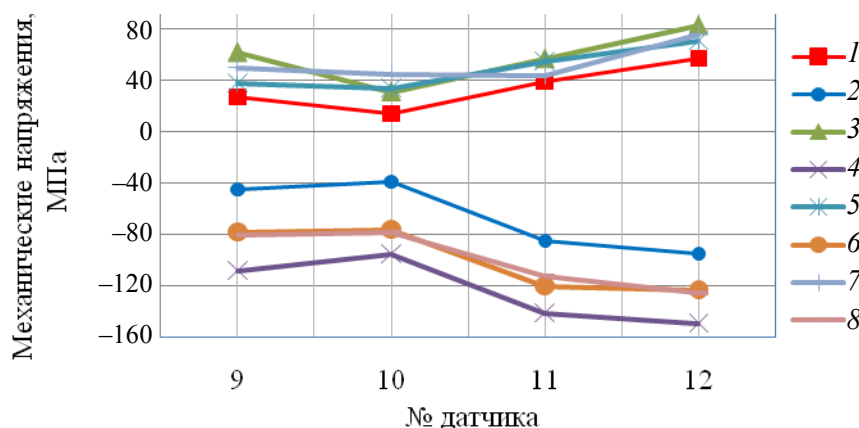


Рис. 5. Зависимость возникающих напряжений в модернизированной конструкции цистерны при различных режимах движения пожарного автомобиля:

1, 2 – режим движения № 1; 3, 4 – режим движения № 2;

5, 6 – режим движения № 3; 7, 8 – режим движения № 4

В табл. 3 представлены максимальные значения растягивающих механических напряжений, зафиксированные тензометрическим комплексом при проведении испытаний на серийной и модернизированной цистернах пожарного автомобиля.

Таблица 3

Максимальные значения растягивающих механических напряжений в областях угловых сварных соединений цистерн пожарного автомобиля

Области сварных соединений	Серийная цистерна, МПа	Модернизированная цистерна, МПа
Угловое сварное соединение передней и боковой стенки	158	108
Угловое сварное соединение передней стенки и дна	173	149

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что существенное влияние на формирование напряженно-деформированного состояния угловых сварных соединений цистерны пожарного автомобиля оказывают растягивающие напряжения. Проведены экспериментальные исследования напряженного состояния угловых сварных соединений серийной и модернизированной цистерн пожарных автомобилей объемом 5 м³ на шасси МАЗ-5337 при различных эксплуатационных режимах движения и установлены максимальные значения возникающих напряжений. Анализ результатов исследований

показал, что напряженное состояние цистерны при движении пожарного аварийно-спасательного автомобиля в значительной мере определяется как геометрическими параметрами элементов ее конструкции, так и режимом движения. Обнаружено, что применение дополнительных упрочняющих элементов позволяет значительно снизить возникающие напряжения в конструкции цистерны пожарного автомобиля, в частности, в угловых сварных соединениях. Сравнительный анализ результатов натурных экспериментов и исследований напряженно-деформированного состояния методом 3D компьютерного моделирования выявил высокую степень корреляции, при этом расхождение значений максимальных напряжений не превышает 6–9 %.

Таким образом, полученные результаты исследований подтверждают эффективность модернизации цистерн пожарного автомобиля на шасси МАЗ-5337 и позволяют рекомендовать разработку к внедрению в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Литература

1. Глинкин, С. А. Расчет деталей поршневых двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / С. А. Глинкин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 107 с.
2. Васильев, В. А. Обзор возможностей современных CAE-программ и приближенных методик аппроксимации диаграмм « σ – ϵ » для решения задач упруго-пластического деформирования / В. А. Васильев, А. В. Самошин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 108–114.
3. Ковтун, В. А. Компьютерное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. А. Жаранов // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 81–90.
4. Optimization of Fire Truck's Tanks on the Chassis MAZ-6317 by the Method of Computer Simulation / V. Kovtun [et al.] // International Journal «NDT Days». – 2019. – Vol. II, iss. 4. – P. 495–500.
5. Короткевич, С. Г. Эксплуатационная надежность цистерн пожарных автомобилей: модернизация стальных конструкций в целях повышения их механических характеристик / С. Г. Короткевич, В. А. Ковтун // Вестн. Полоц. гос ун-та. Сер. В. – 2019. – № 3. – С. 90–94.
6. Оптимизация конструкции цистерны пожарного автомобиля АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 методом компьютерного моделирования / В. А. Ковтун [и др.] // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 38–45.
7. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учеб. пособие / В. А. Бруйка [и др.]. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
8. 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.
9. Мехеда, В. А. Тензометрический метод измерения деформаций : учеб. пособие / В. А. Мехеда. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.