

УДК 614.846.63:004.94

С. Г. КОРОТКЕВИЧ, В. А. КОВТУН

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, Беларусь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИСТЕРН ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложена новая методика моделирования напряженно-деформированного состояния цистерн пожарных автомобилей, отличающаяся учетом экспериментально определенных эксплуатационных нагрузок при различных режимах движения. Разработанные в соответствии с методикой конечно-элементные модели цистерн пожарных автомобилей водоизмещением десять тонн на шасси нового поколения МАЗ-6317 позволили исследовать характер формирования и уровень возникающих механических напряжений в конструкции.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, цистерна, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель, сварное соединение, запас прочности.

Введение. Анализ аварийно-спасательных работ, проводимых подразделениями Министерства по чрезвычайным ситуациям, свидетельствует о том, что фактор времени оказывает решающее влияние на процесс развития пожаров, при этом в Республике Беларусь прямой материальный ущерб от всех пожаров ежегодно составляет порядка 34,0 млн бел. руб. [1]. Для оперативного прибытия спасателей необходимо наличие современной техники, обладающей высокими эксплуатационными характеристиками. Поэтому проведение и реализация мероприятий по разработке новых конструкций цистерн и модернизации существующих является одной из приоритетных задач.

Сравнительный анализ количества выездов пожарной аварийно-спасательной техники на ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций в Республике Беларусь показал, что основной привлекаемой единицей является пожарная автоцистерна, в которой основным элементом является цистерна для перевозки огнетушащей жидкости [2]. Эффективность использования пожарных автомобилей с цистерной большого объема обусловлена повышением тактических возможностей при тушении пожаров в безводных районах и населенных пунктах, слабо оснащенных водными коммуникациями, а также при тушении лесных и торфяных пожаров. Современные образцы техники на шасси МАЗ-6317 способны перевозить 8–12 тонн воды.

При производстве пожарных автоцистерн весьма важным является соблюдение повышенных требований к прочности конструкции самой цистерны, которая при движении испытывает значительные повторно-переменные нагрузки [3, 4]. Анализ данных о ремонтах пожарных автомобилей позволил установить, что одним из основных видов повреждений является нарушение сплошности металла в областях сварных соединений цистерны. Устранение

такой неисправности требует большого объема подготовительных и ремонтных работ, что снижает боевую готовность подразделений МЧС [5]. Одним из путей решения данной проблемы является научно обоснованное проектирование конструкции, оптимизация расположения устанавливаемых элементов и ребер жесткости, что является сложной технической задачей.

Целью данной работы является исследование прочностных характеристик цистерн пожарных автомобилей водоизмещением 10 тонн с применением разработанной методики моделирования их напряженно-деформированного состояния, позволяющей учитывать действующие эксплуатационные нагрузки при движении по дорогам с различным дорожным покрытием.

Результаты исследований. Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) цистерн пожарных автомобилей разработана новая расчетная методика, основанная на двухэтапном подходе, включающем экспериментальное установление возникающих под действием сил инерции максимальных значений ускорений на поверхности стенок цистерн и разработку адаптированных к режимам движения пожарных автомобилей конечно-элементных моделей (рисунок 1) [2, 5, 6].

Определены основные эксплуатационные режимы, соответствующие условиям оперативного движения пожарного автомобиля: режим № 1 – движение по прямому участку асфальтированной дороги со скоростью 50 км/ч; режим № 2 – движение по проселочной дороге с чередующимися неровностями и перепадами высот при допустимой скорости 20–30 км/ч; режим № 3 – движение по прямому участку асфальтированной дороги со скоростью 50 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 км/ч и экстренное торможение до полной остановки пожарного автомобиля. Эксперименты в каждом режиме движения пожарного автомобиля проводились с повторением по 3 раза.

Исследования действующих эксплуатационных нагрузок на конструкцию цистерны пожарного автомобиля объемом 10 м³ на шасси МАЗ-6317 проведены при помощи измерительного комплекса «Ларсон Дэвис 2900» и акселерометров типа 352С18. Места установки датчиков на внешней поверхности стенок конструкции определялись путем проведения замеров на равноудаленное расстояние от сварных швов, ребер жесткости и иных конструктивных элементов, влияющих на жесткость цистерны.

Проведенные исследования позволили установить, что значения ускорений, возникающих под действием сил инерции на поверхности стенок конструкции цистерны, а с ними и эксплуатационных нагрузок на конструкцию цистерны в значительной мере зависит от режимов движения пожарного автомобиля. Как видно из таблицы 1, наибольшие значения ускорений зафиксированы при движении пожарного автомобиля со скоростью 20–30 км/ч по проселочной дороге с чередующимися неровностями и перепадами высот (режим № 2), при этом максимальное значение на стенке цистерны составило 25,2 м/с².

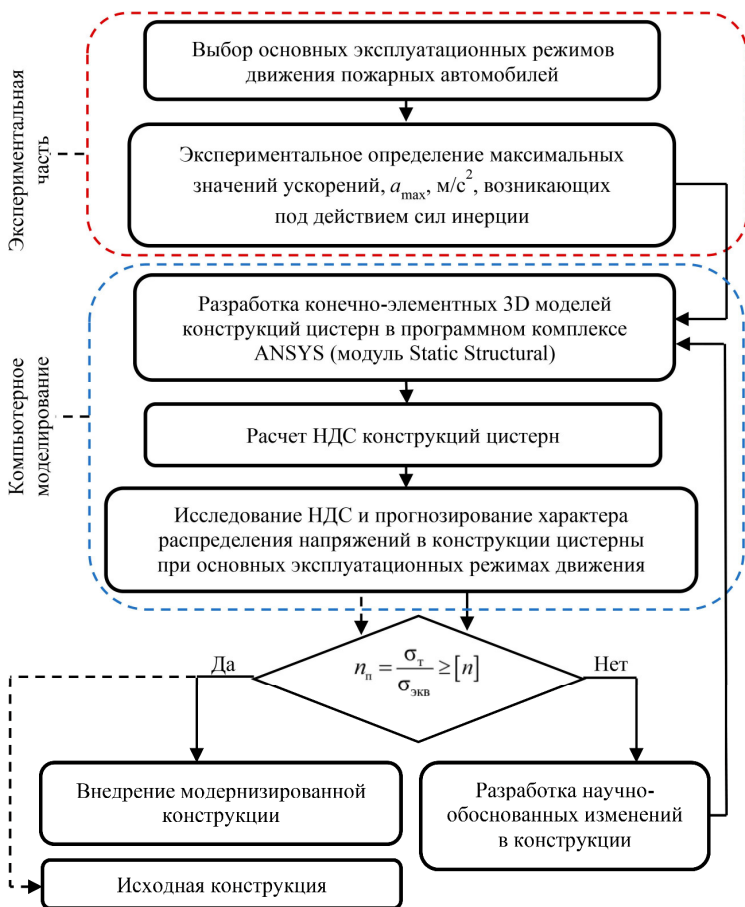


Рисунок 1 – Методика моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей

Таблица 1 – Максимальные значения ускорений, зафиксированные на поверхности стенок цистерны во время испытаний пожарного автомобиля

В метрах за секунду в квадрате

Режим движения	Датчик 1 передняя стенка	Датчик 2 передняя стенка	Датчик 3 боковая стенка	Датчик 4 боковая стенка
Режим № 1	7,1±0,4	9,2±0,5	6,6±0,3	10,8±0,6
Режим № 2	15,1±1	24,7±1,2	16,4±1,2	25,2±1,2
Режим № 3	14,2±0,7	19,1±1,1	11,8±0,8	19,4±1,1
Режим № 4	14,7±0,9	22,9±1,1	16,5±0,4	21,6±0,9

Разработка конечно-элементной модели цистерны пожарного автомобиля объемом 10 м^3 на шасси МАЗ-6317 проводилась в программном комплексе ANSYS. Цистерна выполнена из нержавеющей стали марки AISI 430 2В [7] и состоит из передней, задней, боковых стенок, выполненных с ребрами жесткости, дна и крыши. Дно цистерны усилено расположенными поперечно профилями П-образного сечения и опирается на два лонжерона через демпфирующие элементы и шесть кронштейнов с сайлентблоками. Внутри цистерны расположены пенобак, поперечные и продольные волноломы. Граничными условиями принято закрепление цистерны по нижней части лонжеронов с учетом демпфирующих элементов. Для каждого режима движения принято гидростатическое давление на стенки цистерны с учетом вектора действующей силы (по осям XYZ) и плотности жидкости, а также заданы максимальные значения ускорений, возникающих на поверхности стенок цистерны под действием сил инерции, которые получены экспериментально с использованием измерительного оборудования: режим № 1 – $10,8 \text{ м/с}^2$; режим № 2 – $25,2 \text{ м/с}^2$; режим № 3 – $19,4 \text{ м/с}^2$; режим № 4 – $22,9 \text{ м/с}^2$ (см. таблицу 1).

При решении статической задачи упруго-деформированного тела методом конечно-элементного моделирования применены математические выражения, определяющие динамические перемещения, 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 пожарного автомобиля применена система дифференциальных уравнений движения в частных производных [8, 9]:

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

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – компоненты тензора напряжений, МПа; F_x, F_y, F_z – проекции вектора внешних объемных (массовых) сил, Н/м^3 ; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; u_x, u_y, u_z – проекции вектора перемещения выделенного элемента на координатные оси x, y, z соответственно, м; t – время, с.

Для определения возникающих в конструкции максимальных значений напряжений и деформаций принята форма прогиба W стенок цистерны пожарного автомобиля в виде [10]

$$W = W_0 \sin \frac{\pi x}{l},$$

где W_0 – максимальный прогиб, м; x – перемещение, м; l – длина стенки, м.

Максимальный прогиб определялся, исходя из относительных деформаций стенок цистерны пожарного автомобиля [11],

$$\varepsilon_m = 2,45 \frac{i}{h\sqrt{E\rho}},$$

где ε_m – максимальная деформация стенки, м; i – удельный импульс, Н·с/м²; h – высота стенки, м.

Разработанная конечно-элементная модель цистерны пожарного автомобиля объемом 10 м³ на шасси МАЗ-6317 содержит 438178 узлов и 459277 элементов с размером грани 0,01 м. Расчет ее НДС позволил получить картины распределения эквивалентных по Мизесу напряжений (рисунок 2).

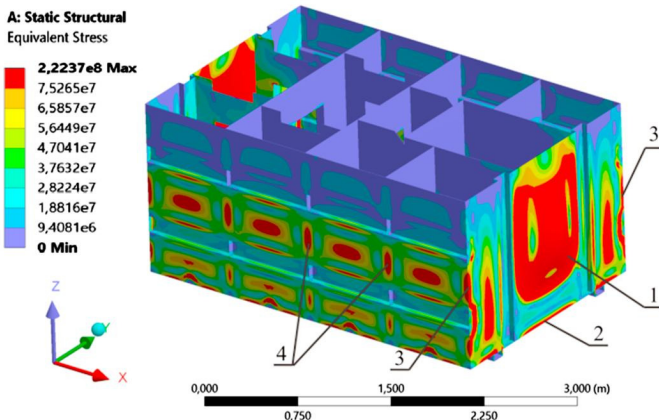


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в конструкции цистерны пожарного автомобиля объемом 10 м³ на шасси МАЗ-6317 при моделировании режима движения № 2:

- 1 – торцевое соединение пенобака и передней стенки, 2 – угловое соединение дна и передней стенки, 3 – угловое соединение передней и боковых стенок, 4 – торцевое соединение поперечных волноломов и боковых стенок

На рисунке 3, а представлены диаграммы, демонстрирующие влияние режимов движения пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 на эквивалентные напряжения по Мизесу в областях сварных соединений цистерны объемом 10 м³. На рисунке 3, б показаны полученные значения коэффициентов запаса прочности рассмотренных сварных соединений.

Анализ полученных результатов позволил установить, что наибольшие эквивалентные по Мизесу напряжения возникают в областях сварных соединений цистерны при движении пожарного автомобиля в режиме № 2 и составляют 165–186 МПа. При этом коэффициент запаса прочности равен $n_n = 1,2 \dots 1,4$ что недостаточно для надежной эксплуатации конструкций данного типа.

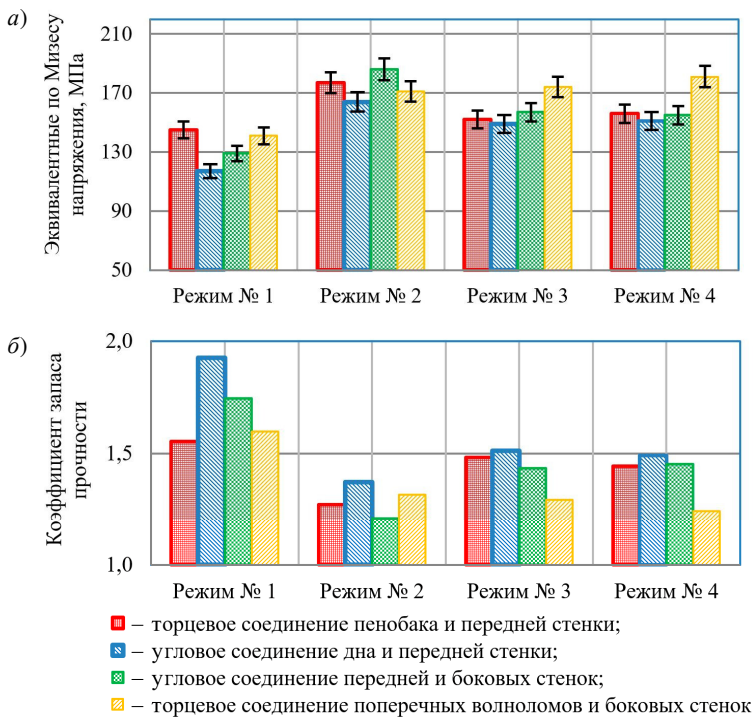


Рисунок 3 – Влияние режимов движения пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 на эквивалентные по Мизесу напряжения (а) и коэффициент запаса прочности (б) в областях сварных соединений цистерны объемом 10 м³

Заключение. В результате проведенных исследований предложена методика моделирования НДС конструкций цистерн пожарных автомобилей, основанная на разработанных конечно-элементных моделях, которая наряду с физико-механическими характеристиками, геометрическими параметрами и расположением элементов конструкции учитывает возникающие под действием сил инерции экспериментально установленные максимальные значения ускорений на поверхности стенок. Методика позволяет проводить проектные расчеты и исследовать прочностные характеристики конструкций цистерн с учетом действующих эксплуатационных нагрузок.

Разработанные новые конечно-элементные модели позволили исследовать влияние основных режимов движения пожарных автомобилей на шасси МАЗ-6317 на уровень возникающих механических напряжений и характер их распределения в конструкции. Полученные результаты являются основой для выработки предложений по модернизации серийных и разработке перспективных конструкций цистерн пожарных автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ обстановки с чрезвычайными ситуациями в Республике Беларусь в 2016 году / А. В. Жовна [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2017. – № 1 (41). – С. 24–30.

2 **Ковтун, В. А.** Компьютерное моделирование и исследование напряжённо-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.

3 **Высоцкий, М. С.** Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2006. – 320 с.

4 **Kuzniatsova, M.** Definition of rational form of lateral perforated baffle for road tanks / M. Kuzniatsova, A. Shimanovsky // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 72–79.

5 **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.

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

7 AISI 430 сталь нержавеющая – характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://emk24.ru/wiki/astm_standarty/astm_a240_2186585/. – Дата доступа : 24.05.2021.

8 **Подскребко, М. Д.** Соппротивление материалов : учеб. / М. Д. Подскребко. – Минск : Выш. шк., 2007. – 797 с.

9 **Скойбеда, А. Т.** Детали машин. Теория и расчет : учебно-методическое пособие / А. Т. Скойбеда, В. А. Агейчик, И. Н. Кононович. – Минск : БГАТУ, 2014. – 372 с.

10 **Клаф, Р.** Динамика сооружений : пер. с англ. / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.

11 Взрывные явления. Оценка и последствия : в 2 кн. Кн. 1. : пер. с англ. / У. Бейкер [и др.]; под ред. Я. Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. – М. : Мир, 1986. – 319 с.

S. G. KOROTKEVICH, V. A. KOVTUN

University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF TANKS OF FIRETRUCKS AT THEIR OPERATION

A new method of stress-strain state modeling for the fire truck's tanks is proposed, it is distinguished by taking into account experimentally determined operational loads under various driving modes. The finite element models are developed in accordance with the methodology for the ten-tons water capacity tanks on the MAZ-6317 chassis of new generation make it possible to investigate the nature of the formation and the level of mechanical stresses in the structure.

Keywords: fire truck, tank, stress-strain state, finite element model, welded joint, safety factor.

Получено 02.11.2021