

УДК 614.846.63:004.94

*В. А. КОВТУН, доктор технических наук, С. Г. КОРОТКЕВИЧ, Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Минск; В. А. ЛОДНЯ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИСТЕРН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил оценить напряженно-деформированное состояние цистерн пожарных автомобилей в процессе эксплуатации. С использованием компьютерного моделирования разработаны новые 3D конечно-элементные модели цистерн прямоугольного сечения объемом  $10 \text{ м}^3$  и исследовано влияние типа, размеров, расположения элементов, повышающих жесткость их конструкций, на уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах, к которым относятся угловые и тавровые соединения элементов. В работе представлены проектные расчеты и рекомендации по конструированию цистерн пожарных автомобилей, обладающих повышенными прочностными характеристиками.

**В**ведение. Анализ аварийно-спасательной работы подразделений Министерства по чрезвычайным ситуациям свидетельствует о том, что фактор времени оказывает решающее влияние на процесс развития пожаров. Время прибытия спасателей во многом определяется наличием современной и надежной техники, поскольку от этого зависят человеческие жизни и причиняемый ущерб от пожаров.

Согласно статистике более 60 % всех пожаров в Республике Беларусь происходит в сельской местности, а также в природных экосистемах [1]. В результате пожарные автоцистерны вынуждены осуществлять движение при отсутствии ровного дорожного покрытия по проселочным дорогам и бездорожью. Кроме того, ежедневно движение пожарных автомобилей к месту возникновения чрезвычайных ситуаций происходит в режимах «ускорение», «торможение», «поворот» [2]. При таких условиях цистерны испытывают значительные повторно-переменные нагрузки, передаваемые на ее конструкцию через раму шасси и от давления жидкости. Проведенный анализ показал, что общее количество ремонтируемых цистерн пожарных автомобилей 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. Таким образом, целью работы является расчет и проектирование цистерн пожарных автомобилей, а также исследование влияния эксплуатационных нагрузок, геометрических параметров, расположения элементов цистерн, повышающих жесткость их конструкций, на возникающее напряженно-деформированное состояние и запас прочности.

**Методика исследований.** В качестве объекта исследований выбраны наиболее распространенные модели цистерн пожарных автомобилей объемом  $10 \text{ м}^3$  на шасси МАЗ-6317. Для оценки напряженного состояния конструкций цистерн, возникающего при различных режимах и условиях движения пожарных автомобилей, предложена новая расчетная методика, основанная на двухэтапном подходе, включающем экспериментальное установление максимальных значений ускорения, возникающего под действием инерционных нагрузок в конструкциях цистерн, и разработку конечно-элемент-

ных моделей, адаптированных к режимам движения пожарных автомобилей [3].

При проведении исследований определены режимы и условия, характеризующие особенности движения пожарных автомобилей к месту ликвидации чрезвычайных ситуаций: режим № 1 – движение по прямому участку асфальтированной дороги со скоростью  $50 \pm 2 \text{ км/ч}$ ; режим № 2 – движение по грунтовым дорогам категории VI-6 с допустимой скоростью 20–30 км/ч; режим № 3 – движение по прямому участку асфальтированной дороги со скоростью  $50 \pm 2 \text{ км/ч}$  с последующим замедлением двигателем до скорости 10–15 км/ч для вхождения в левый поворот на  $90^\circ$ ; режим № 4 – ускорение с места по прямому участку асфальтированной дороги до скорости 30 км/ч и экстренное торможение до полной остановки пожарного автомобиля.

Порядок проведения экспериментальных исследований и компьютерного моделирования представлен в работах [3–6].

Проектируемые современные цистерны пожарных автомобилей схожи по форме, конструктивному исполнению и расположению элементов. В связи с этим, учитывая разработанные ранее научно-обоснованные решения по модернизации цистерн объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарных автомобилей на шасси МАЗ-6317 [5], а также цистерн объемом  $5 \text{ м}^3$  пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 [4], проведены проектные расчеты по модернизации цистерн объемом  $10 \text{ м}^3$  пожарных автомобилей на шасси МАЗ-6317.

Создание 3D-модели цистерны объемом  $10 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 в масштабе 1:1 проводилось в программном комплексе SolidWorks. Конструкция цистерны выполнена из нержавеющей стали марки AISI 430 2B и имеет прямоугольное сечение с геометрическими размерами  $3000 \times 2500 \times 1340 \text{ мм}$  (рисунок 1, а). Стенки цистерны выполнены из листового металла толщиной 4 мм, а дно – 5 мм. Дно конструкции усилено расположенными поперечно профилями П-образного сечения (рисунок 1, б) и опирается через демпфирующие резиновые вставки на два донжера и десять кронштейнов с сайлентблоками. Внутри цистерны расположены пенобак, поперечные и продольные волноломы. Разработка ее конечно-элементной модели проводилась в программном комплексе ANSYS (модуль

Static Structural), которая содержит 357 217 узлов и 335 123 элемента с размерами граней 0,015 м.

В настройках расчетной модели для каждого режима движения заданы максимальные значения ускорения, возникающего в конструкции цистерны под действием инерционных нагрузок, которые получены экспериментально с использованием измерительного оборудования: режим № 1 – 10,8 м/с<sup>2</sup>; режим № 2 – 25,2 м/с<sup>2</sup>; режим № 3 – 19,4 м/с<sup>2</sup>; режим № 4 – 22,9 м/с<sup>2</sup> [3, 6].

В результате расчета установлено, что наибольшим нагрузкам при движении подвержены угловые соединения стенок, стенок и дна, а также тавровые соединения волноломов и стенок, пенобака и передней стенки цистерны, при этом максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу составляют 151–191 МПа.

**Проектные расчеты.** Для снижения напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерны, предложено оптимизировать геометрические параметры элементов, повышающих жесткость конструкции, в частности горизонтальных ребер жесткости на ее боковых стенках, выполненных штамповкой. При проведении расчетов рассматривалось снижение длины данных ребер жесткости на отступ, равный  $L$  от каждой стороны угловых соединений стенок конструкции

(см. рисунок 1, а). В результате исследований установлено, что при выполнении горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках цистерны без контакта с угловыми соединениями передней, задней и боковыми стенками конструкции на отступ, равный  $L = 150$  мм от каждой стороны угловых соединений, обеспечивается снижение уровня напряжений на 34–36 МПа, возникающих в областях угловых соединений стенок (рисунок 2).

Для снижения напряжений, возникающих в областях тавровых соединений поперечных волноломов и боковых стенок цистерны пожарных автомобилей, проведена оптимизация расположения верхнего ребра жесткости на ее боковых стенках по высоте  $H$  (см. рисунок 1, а). В результате исследований установлено, что снижение высоты верхнего ребра жесткости со стандартной  $H = 1000$  мм до  $H = 850$  мм в модернизированной цистерне обеспечивает снижение уровня напряжений на 26–29 МПа, возникающих в областях II тавровых соединений поперечных волноломов и боковых стенок. Дальнейшее снижение высоты расположения верхнего ребра жесткости способствует критическому росту напряжений в областях I тавровых соединений поперечных волноломов и боковых стенок (рисунок 3).

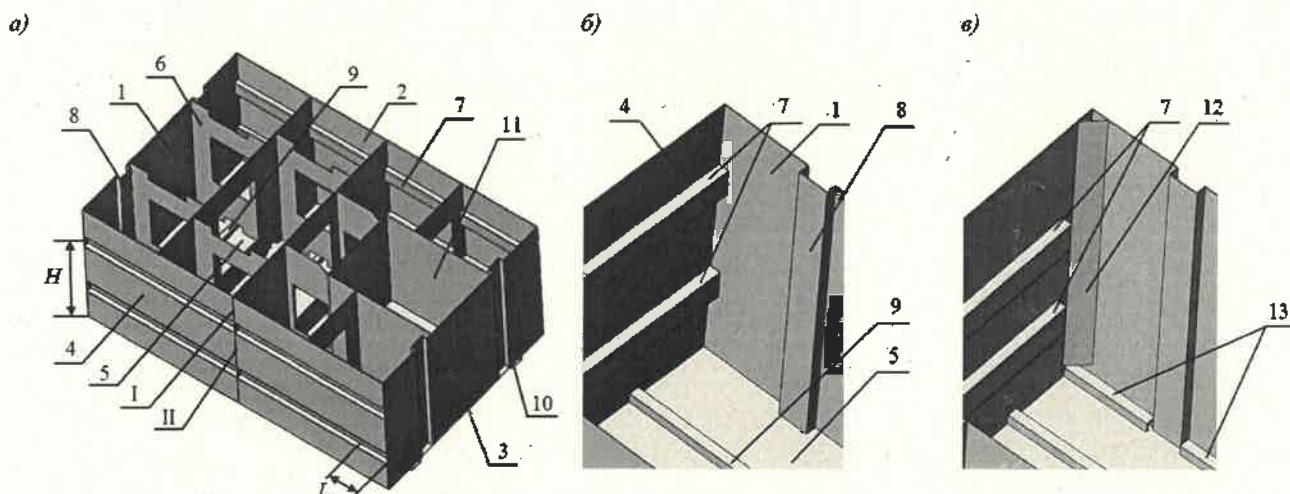


Рисунок 1 – 3D-модель серийной цистерны объемом 10 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 (а) (вид без крыши); вид изнутри угловых соединений передней, боковой стенок и дна серийной (б) и модернизированной (в) конструкций;

1, 3 – передняя и задняя стенки; 2, 4 – боковые стенки; 5 – дно; 6 – волноломы (внутренние продольные и поперечные); 7, 8 – ребра жесткости; 9 – поперечные усиления в виде профилей П-образного сечения; 10 – продольные лонжероны; 11 – пенобак; 12 – косынка; 13 – дополнительные профили П-образного сечения;

I, II – области тавровых соединений волноломов и боковых стенок

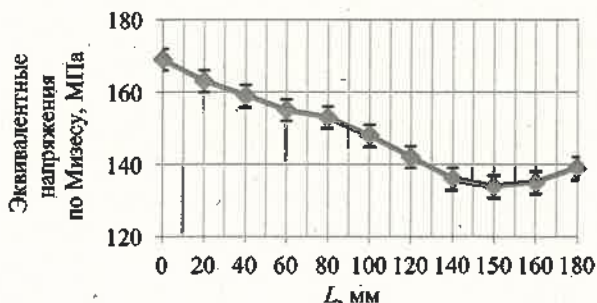


Рисунок 2 – Зависимость влияния геометрических параметров горизонтальных ребер жесткости на напряжения, возникающие в областях угловых соединениях передней, задней и боковых стенок цистерны

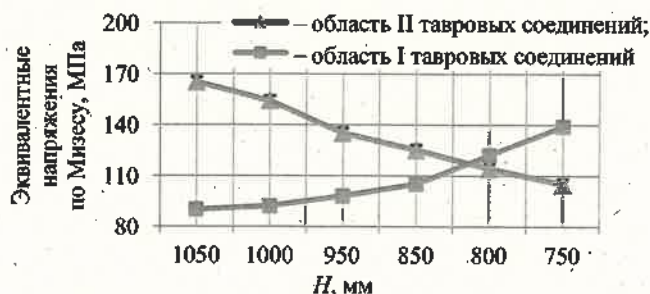


Рисунок 3 – Зависимости влияния высоты расположения верхнего ребра жесткости на боковых стенках на напряжения, возникающие в областях тавровых соединений поперечных волноломов и боковых стенок

Для снижения напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерны пожарного автомобиля, предложена дополнительная установка косынок в виде полосы в вертикальной плоскости под углом  $45^\circ$  к находящимся в контакте стенкам. Необходимо отметить, что применение косынок возможно при выполнении горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках цистерны без контакта с угловыми соединениями передней, задней и боковыми стенками конструкции. На рисунке 4 представлены результаты расчетов серийной и модернизированной конструкций.

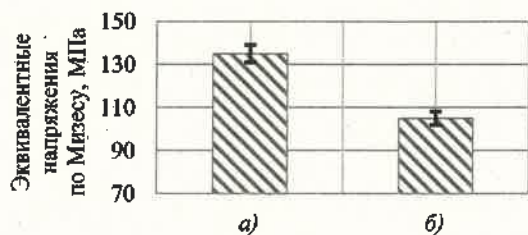


Рисунок 4 – Зависимость влияния типа конструкций цистерн пожарных автомобилей на напряжения, возникающие в областях угловых соединений стенок: а – серийной; б – модернизированной с установленными косынками

Исследования показали, что применение косынок в виде полосы с размерами  $1280 \times 150 \times 4$  мм обеспечило снижение уровня напряжений на 29–31 МПа, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерны.

Для снижения напряжений, возникающих в областях угловых соединений передней, задней стенок и дна, предложена дополнительная установка профилей равнополочных П-образного сечения с размерами  $50 \times 50 \times 4$  мм. На рисунке 5 представлены результаты сравнительного расчета серийной и модернизированной цистерны.



Рисунок 5 – Зависимость влияния типа конструкций цистерн пожарных автомобилей на напряжения, возникающие в областях угловых и тавровых соединений: а – серийной; б – модернизированной с установленными профилями П-образного сечения

В результате исследований определено, что дополнительная установка шести профилей равнополочных П-образного сечения с размерами  $50 \times 50 \times 4$  мм (двух штук длиной 1080 мм, четырех – 520 мм), которые закреплены на дне вдоль передней и задней стенок на

расстоянии 15–20 мм от угловых соединений передней, задней стенок и дна, обеспечивает снижение уровня напряжений в данных областях соединений на 43–45 МПа, угловых соединений стенок на 6–8 МПа, а также тавровых соединений пенобака и передней стенки на 8–10 МПа.

На основании полученных результатов исследований разработана 3D-модель модернизированной цистерны объемом  $10 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317, в которой комплексно реализованы предлагаемые изменения в конструкции: горизонтальные ребра жесткости на боковых стенках цистерны выполнены без контакта с угловыми соединениями передней, задней и боковыми стенками конструкции на отступ, равный  $L = 150$  мм с каждой стороны угловых соединений; верхнее ребро жесткости на боковой стенке расположено на высоте 850 мм от дна; дополнительно установлены четыре косынки в виде полосы размерами  $1280 \times 150 \times 4$  мм в вертикальной плоскости под углом  $45^\circ$  к находящимся в контакте стенкам и шесть профилей равнополочных П-образного сечения размерами  $50 \times 50 \times 4$  мм (двух штук длиной 1080 мм, четырех – 520 мм), которые закреплены на дне вдоль передней и задней стенок на расстоянии 15–20 мм от угловых соединений передней, задней стенок и дна (см. рисунок 1, в). Ее конечно-элементная модель содержит 338273 узла и 359242 элемента. В результате расчета установлено снижение уровня напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах модернизированной конструкции цистерны объемом  $10 \text{ м}^3$ , в частности угловых соединений стенок на 36–40 %, угловых соединений передней, задней стенок и дна на 23–24 %, тавровых соединений волноломов и боковых стенок на 18–21 %, а также тавровых соединений пенобака и передней стенки на 5–7 %. При этом максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу составляют 128–146 МПа.

Практика показывает, что в процессе эксплуатации цистерн пожарных автомобилей под действием эксплуатационных нагрузок весьма часто происходят нарушения герметичности конструкции в областях угловых сварных соединений стенок. На основании полученных результатов компьютерного моделирования проведен сравнительный расчет на прочность исследуемых конструкций цистерн пожарных автомобилей. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Коэффициент запаса прочности по пределу выносливости  $n_s$  для угловых сварных соединений цистерн пожарных автомобилей определялся по формуле [7–8]

$$n_s = \frac{\tau_{-1} - \psi_\sigma \tau_m}{\tau_\sigma K_\sigma}, \quad (1)$$

где  $\tau_{-1}$  – предел выносливости, МПа;  $\psi_\sigma$  – коэффициент, учитывающий влияние асимметрии цикла на предел выносливости;  $\tau_m$  – среднее напряжение цикла, МПа;  $\tau_\sigma$  – амплитуда цикла, МПа;  $K_\sigma$  – коэффициент, учитывающий совместное влияние концентрации напряжений, качества обработки поверхности и размеров детали;

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициентов запаса прочности серийных и модернизированных цистерн пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317

Узлы в конструкциях, подверженные наибольшему нагружению	Расчетные значения коэффициентов запаса прочности цистерн пожарных автомобилей (серийная/модернизированная)					
	объемом 5 м <sup>3</sup> на шасси МАЗ-5337		объемом 8 м <sup>3</sup> на шасси МАЗ-6317		объемом 10 м <sup>3</sup> 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

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести  $n_T$  определялся по формуле [9].

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{экв}}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа.

Результаты расчетов позволили установить повышение коэффициента запаса прочности в 1,2–1,6 раза в модернизированных конструкциях по сравнению с серийными.

**Заключение.** Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил установить закономерности, связывающие уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах, с режимами, условиями движения пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317, типом, размерами и расположением элементов, повышающих прочностные характеристики 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 разработку модернизированных конструкций с повышенными прочностными характеристиками.

Разработанные по критериям нагруженности и прочности рекомендации по конструированию модернизированных цистерн пожарных автомобилей на шасси МАЗ-5337 и МАЗ-6317 защищены патентами [10–11], а также внедрены на производственном предприятии пожарной техники ООО «ПОЖСНАБ».

#### Список литературы

1 Сведения о чрезвычайных ситуациях // МЧС Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа :

Получено 14.04.2022

V. A. Kovtun, S. G. Korotkevich, V. A. Lodnya. Calculation and design of fire truck's rectangular tanks with increased strength characteristics.

The complex of theoretical and experimental studies made it possible to assess the stress-strain state of fire truck tanks during operation. Using computer modeling, new 3D finite element models of rectangular tanks with a volume of 10 m<sup>3</sup> have been developed and the influence of the type, size, location of elements that increase the rigidity of their structures on the level of stresses arising in the most loaded nodes, which include corner and T-joints of elements, has been studied. The paper presents design calculations and recommendations for the design of tanks of fire trucks with increased strength characteristics.

<https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs>. – Дата доступа : 16.09.2019.

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

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 гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 81–90. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.81.

4 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 гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 316–327. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.316.

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, is. 4. – P. 495–500.

6 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.

7 Иосифевич, Г. Б. Детали машин : учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.

8 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 им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 35–43.

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

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

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