

УДК 614.846.63

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИСТЕРН ВОДОИЗМЕЩЕНИЕМ ВОСЕМЬ ТОНН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ К МЕСТУ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

**В. А. КОВТУН, С. Г. КОРОТКЕВИЧ**

*Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,  
г. Минск*

*Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований напряженного состояния цистерн пожарных автомобилей с учетом воздействия эксплуатационных нагрузок. Разработаны новые конечно-элементные модели цистерны объемом 8 м<sup>3</sup>, которые адаптированы к характерным режимам движения пожарных автомобилей на шасси МАЗ-6317 к месту ликвидации чрезвычайных ситуаций. Расчет позволил установить характер формирования напряженного состояния конструкции и уровень возникающих эквивалентных напряжений по Мизесу в наиболее нагруженных узлах, а также обосновать применение и оптимальное расположение горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках цистерны по критериям нагруженности и геометрических параметров.*

**Ключевые слова:** пожарный автомобиль, цистерна, ускорения, напряжения, режим движения, модернизация, моделирование, ребро жесткости.

## RESEARCH OF THE STRESS CONDITION OF TANKS WITH A DISPLACEMENT OF EIGHT TONS DURING THE MOVEMENT OF FIRE TRUCKS TO THE PLACE OF LIQUIDATION OF EMERGENCY SITUATIONS

**V. A. KOVTUN, S. G. KOROTKEVICH**

*Educational Institution "University of Civil Protection  
of the Ministry for Emergency Situations of the Republic  
of Belarus", Minsk*

*The article presents the results of experimental and theoretical research of the stress state of fire trucks tanks taking into account the effect of operational loads. New finite-element models of a tank with a volume of 8 m<sup>3</sup> have been developed, which are adapted to the characteristic modes of movement of fire vehicles on the chassis MAZ-6317 to the place of emergency situations. The calculation made it possible to establish the nature of the formation of the stress state of the structure and the level of equivalent Mises stresses in the most loaded units, as well as to justify the use and optimal arrangement of horizontal stiffening ribs on the side walls of the tank according to the criteria of loading and geometric parameters.*

**Keywords:** fire truck, tank, accelerations, stresses, driving mode, modernization, modeling, stiffening rib.

### **Введение**

К основным транспортным средствам специального назначения, эксплуатируемым в подразделениях Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, относится пожарная автоцистерна. Одной из тенденций, наблюдаемых при производстве современной техники, в том числе и пожарной аварийно-спасательной, является снижение материалоемкости при повышении нагрузочно-скоростных показателей.

При производстве пожарных автоцистерн получили распространение тонкостенные конструкции прямоугольного сечения, применение которых позволяет более полно использовать ширину шасси, способствует снижению центра массы автомобиля, увеличивает полезный объем емкости для воды и обеспечивает оптимальное расположение большого количества перевозимого аварийно-спасательного оборудования [1].

В Республике Беларусь и за рубежом опубликован ряд работ по проектированию и обеспечению эксплуатационной надежности конструкций цистерн для перевозки жидких грузов. Работы посвящены разработке методик оценки влияния геометрических и физических параметров на способность перегородок демпфировать колебания цистерн [2], [3], установлению закономерностей распределения давления жидкости в котле цистерны [4] и значений гидродинамических давлений, сил и моментов, определяющих влияние перетекания жидкости на динамические свойства цистерн [5], [6]. В работах также исследованы различные типы перегородок, позволяющие снизить гидродинамические нагрузки на конструкцию цистерны и повысить устойчивость транспортного средства.

Проведенный анализ позволил установить, что большинство исследований посвящено конструкциям цилиндрической формы, а также железнодорожным цистернам. При этом весьма мало исследований посвящено анализу влияния действующих эксплуатационных нагрузок при движении автомобилей по дорогам с различным дорожным покрытием на напряженное состояние цистерн прямоугольного сечения.

В связи с этим разработана современных расчетных методик, позволяющих исследовать характер формирования напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн при различных режимах и условиях движения пожарных автомобилей, а также определять уровень их нагруженности, является важной научно-технической задачей.

Таким образом, целью работы является расчет и проектирование цистерн пожарных автомобилей, а также исследование влияния характерных режимов и условий движения, геометрических параметров и расположения элементов, повышающих жесткость их конструкций, на возникающее напряженно-деформированное состояние цистерн.

### **Методика исследований**

Объектом исследований выбрана наиболее распространенная модель цистерны объемом восемь тонн пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317. Для оценки напряженного состояния конструкции цистерны, возникающего при различных режимах и условиях движения пожарных автомобилей, предложена новая расчетная методика, основанная на двухэтапном подходе, включающем экспериментальное установление максимальных значений ускорений, возникающих под действием инерционных нагрузок на поверхностях элементов конструкций цистерн, и разработку адаптированных к режимам движения пожарных автомобилей конечно-элементных моделей [7]–[9].

При проведении исследований определены основные эксплуатационные режимы, соответствующие характерным условиям движения пожарного автомобиля к месту ликвидации чрезвычайных ситуаций: 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.

### **Результаты исследований**

Исследования инерционных нагрузок, возникающих при движении пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317, проведены с помощью измерительного комплекса

«Ларсон Дэвис 2900» и акселерометров типа 352С18. В результате эксперимента установлены зависимости влияния режимов движения пожарного автомобиля на значения ускорений, возникающих под действием инерционных нагрузок на поверхностях элементов конструкции цистерны (рис. 1).

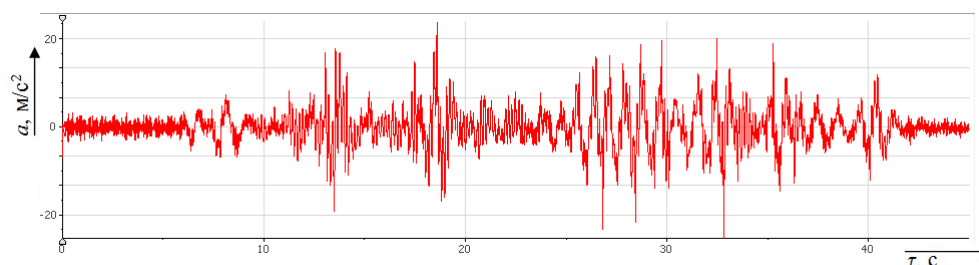


Рис. 1. Зависимость возникающих ускорений от времени движения пожарного автомобиля по проселочной дороге с чередующимися неровностями и перепадами высот со скоростью 20–30 км/ч, м/с<sup>2</sup>

Измерительные датчики устанавливались в вертикальной (передняя и боковая стенки цистерн) и горизонтальной (дно цистерны) плоскостях конструкции. В таблице представлены максимальные значения ускорений, зафиксированные по результатам измерений в исследуемых режимах движения.

**Максимальные значения ускорений, зафиксированные на поверхностях элементов конструкций цистерн при проведении экспериментов, м/с<sup>2</sup>**

Режим движения пожарного автомобиля	Номер датчика и способ его расположения			
	Датчик 1: вертикальная установка	Датчик 2: горизонтальная установка	Датчик 3: вертикальная установка	Датчик 4: горизонтальная установка
№ 1	9,2 ± 0,8	7,4 ± 0,6	8,7 ± 0,7	6,9 ± 0,5
№ 2	15,9 ± 1,4	24,6 ± 1,8	16,2 ± 1,3	23,9 ± 1,8
№ 3	18,1 ± 1,5	12,4 ± 1,2	17,8 ± 1,5	10,8 ± 0,9
№ 4	22,7 ± 1,7	13,4 ± 1,3	14,8 ± 1,4	21,9 ± 1,6

В результате измерений установлены для каждого режима максимальные значения ускорений, которые составили от 9,2 до 24,6 м/с<sup>2</sup>. Полученные результаты свидетельствуют о том, что величина инерционных нагрузок, возникающих на поверхностях элементов конструкций цистерн, в значительной мере зависит от режимов и условий движения пожарных автомобилей.

Создание 3D-модели цистерны объемом 8 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 в масштабе 1:1 проводилось в программном комплексе SolidWorks. Цистерна выполнена из нержавеющей стали марки AISI 430 2В (модуль упругости  $E = 206$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; плотность  $\rho_c = 7700$  кг/м<sup>3</sup>; предел текучести  $\sigma_T = 255$  МПа; предел прочности  $\sigma_B = 560$  МПа) [10]. Стенки цистерны выполнены из листового металла толщиной 4 мм, а дно – 5 мм. Конструкция имеет прямоугольное сечение с геометрическими размерами (2700 × 2450 × 1210 мм) и состоит из передней, задней, двух боковых стенок, выполненных с горизонтально расположенными ребрами жесткости, дна и крыши. Дно цистерны усилено поперечно расположенными профилями П-образного сечения и опирается через демпфирующие резиновые вставки на два лонжерона и десять кронштейнов с сайлентблоками. Внутри цистерны расположены

пенобак, поперечные и продольные волноломы. Разработка конечно-элементной модели проводилась в программном комплексе ANSYS (модуль Static Structural), которая содержит 345 256 узлов и 326 319 элементов с размерами граней 0,015 м. В модели использованы элементы категории SHELL, а в качестве формы элемента дискретизации принят гексаэдр (метод Hex Dominant). Для связи элементов компьютерной модели использовался связанный (Bonded) контакт. В качестве ограничения принято жесткое закрепление цистерны в нижней части лонжеронов пожарного автомобиля. Для каждого режима движения заданы гидростатическое давление на стенки цистерны с учетом вектора действующей силы (по осям XYZ) и плотности жидкости, а также максимальные значения ускорений, возникающих на поверхностях элементов конструкции цистерны под действием инерционных нагрузок, которые получены экспериментально с использованием измерительного оборудования: режим № 1 –  $9,2 \text{ м/с}^2$ ; режим № 2 –  $24,6 \text{ м/с}^2$ ; режим № 3 –  $18,1 \text{ м/с}^2$ ; режим № 4 –  $22,7 \text{ м/с}^2$ .

Расчет конечно-элементной модели цистерны позволил исследовать характер формирования напряженно-деформированного состояния и установить уровень напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах при различных режимах движения пожарного автомобиля (рис. 2).

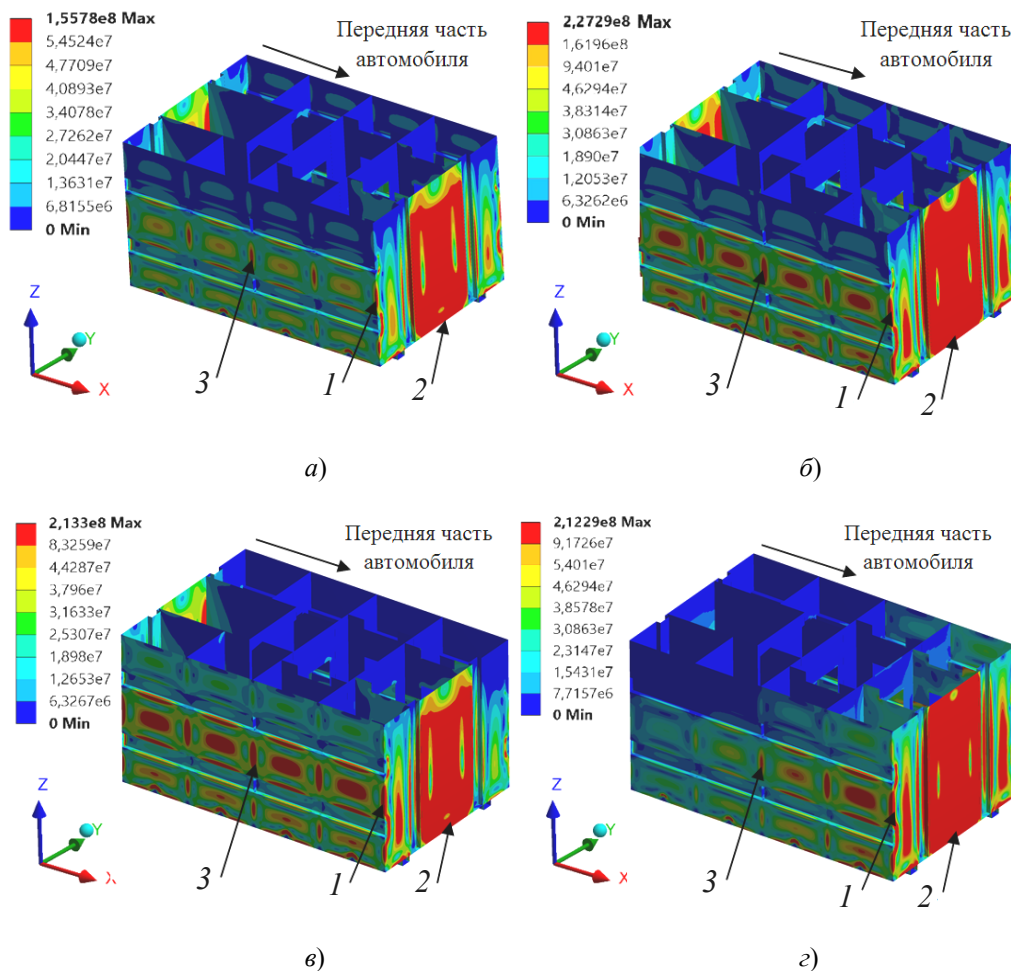


Рис. 2. Распределение полей эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции серийной цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 при моделировании режима № 1 (а), режима № 2 (б), режима № 3 (в), режима № 4 (з), Па:

1 – угловые соединения стенок; 2 – угловые соединения стенок и дна;

3 – торцевые соединения поперечных волноломов и боковых стенок

На рис. 3 представлены максимальные значения напряжений, возникающих в наиболее нагруженных узлах конструкции цистерны при различных режимах движения пожарного автомобиля.

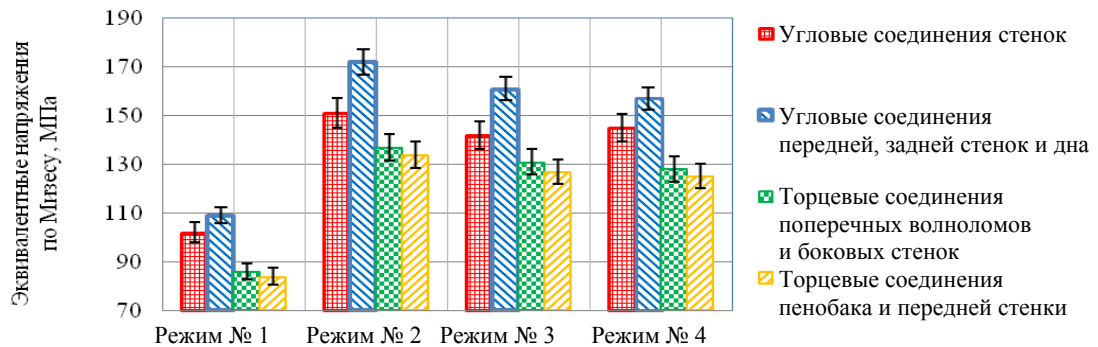


Рис. 3. Зависимости влияния режимов движения пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 на напряжения, возникающие в наиболее нагруженных узлах конструкции цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$

Анализ результатов исследований позволил установить, что при моделировании режима № 2 движения пожарного автомобиля в конструкции цистерны возникают наибольшие значения эквивалентных напряжений по Мизесу, которые составляют  $137\text{--}176 \text{ МПа}$ . В связи с этим данный режим движения принят для проведения дальнейших расчетов.

Практика показывает, что в процессе эксплуатации цистерн пожарных автомобилей, под действием эксплуатационных нагрузок весьма часто происходят нарушения герметичности конструкции в областях угловых соединений стенок. В связи с этим для повышения эксплуатационной надежности цистерн объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарных автомобилей на шасси МАЗ-6317 проведены проектные расчеты, позволившие разработать способы их модернизации. Для наглядной визуализации предлагаемых изменений на рис. 4, а представлена 3D-модель серийной цистерны пожарного автомобиля с указанием фрагмента «А» (вид углового соединения передней и боковой стенок), а на рис. 4, б – конечно-элементная модель цистерны с указанием того же фрагмента.

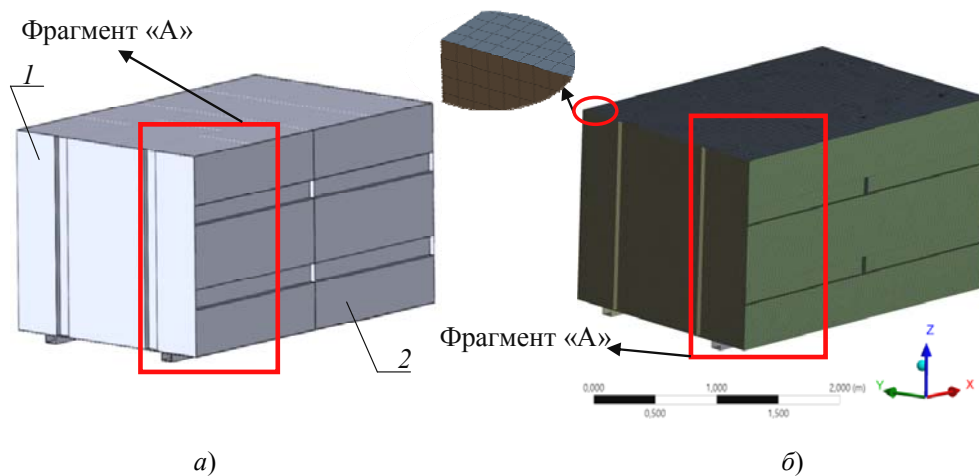


Рис. 4. 3D-модель серийной цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 (а) и ее конечно-элементная модель (б): фрагмент «А» – вид углового соединения передней и боковой стенок; 1 – передняя стенка; 2 – боковая стенка

На рис. 5, *а* представлен фрагмент «А» 3D-модели серийной цистерны объемом 8 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317, а на рис. 5, *б* – тот же фрагмент, на котором отражены результаты расчета напряженно-деформированного состояния.

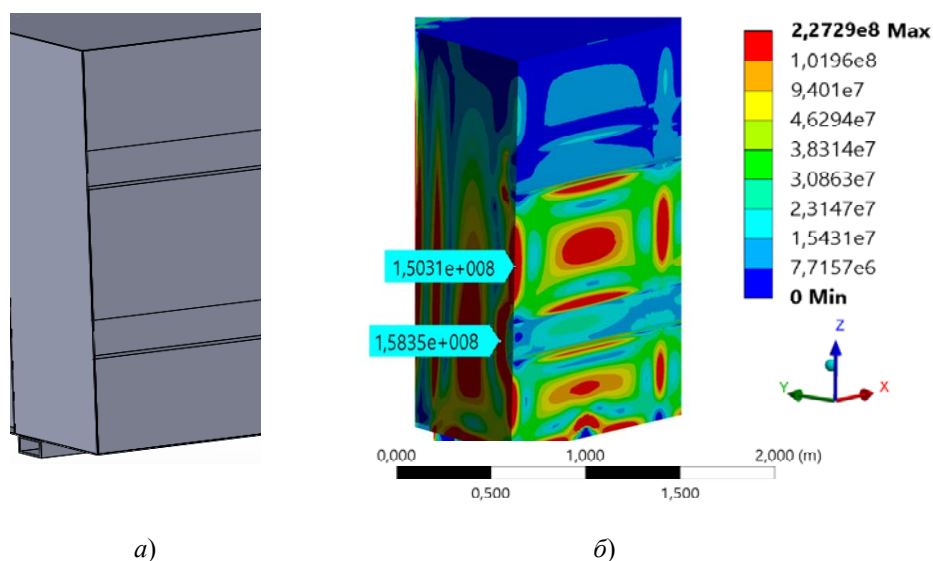


Рис. 5. Вид углового соединения передней и боковой стенок (фрагмент «А») 3D-модели серийной цистерны объемом 8 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 (*а*) и результаты расчета напряженно-деформированного состояния (*б*), Па

Для снижения напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок цистерны, предложена оптимизация геометрических параметров 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. Для снижения напряжений, возникающих в областях торцевых соединений поперечных волноломов и боковых стенок цистерны пожарного автомобиля, проведена оптимизация расположения верхнего ребра жесткости на ее боковых стенках по высоте  $H$  (рис. 6).

На рис. 6, *а* представлен общий вид боковой стенки 3D-модели серийной цистерны, а на рис. 6, *б* – модернизированной цистерны.

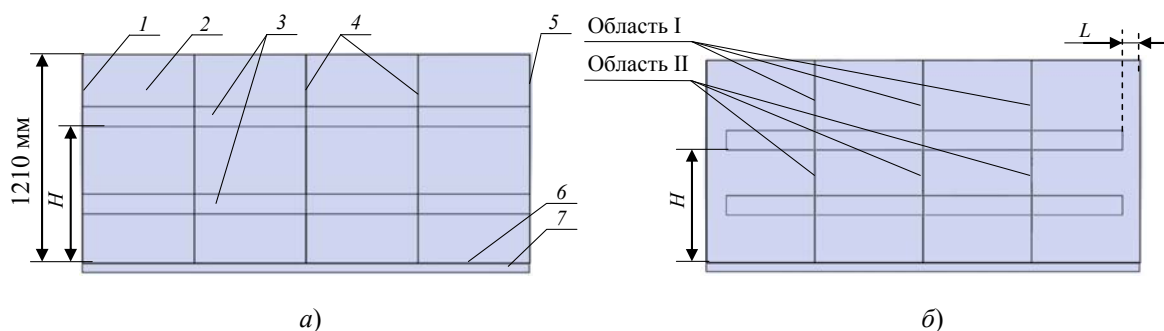


Рис. 6. Общий вид боковой стенки 3D-моделей серийной (*а*) и модернизированной (*б*) цистерны объемом 8 м<sup>3</sup> пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317:  
 1 – передняя стенка; 2 – боковая стенка; 3 – горизонтальные ребра жесткости на боковой стенке; 4 – торцевые соединения поперечных волноломов и боковой стенки; 5 – задняя стенка; 6 – дно; 7 – лонжерон; области I, II – верхние и нижние области торцевых соединений поперечных волноломов и боковых стенок

На рис. 7 представлены результаты расчетов напряжений, возникающих в областях угловых соединений стенок конструкции цистерны в зависимости от геометрических параметров ребер жесткости, расположенных на ее боковых стенках. Исследования показали, что при выполнении горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках цистерны без их контакта с угловыми соединениями передней и задней стенок конструкции с отступом, равным  $L = 140$  мм от каждой стороны угловых соединений, обеспечивается снижение уровня напряжений на 32–34 МПа в областях угловых соединений стенок.

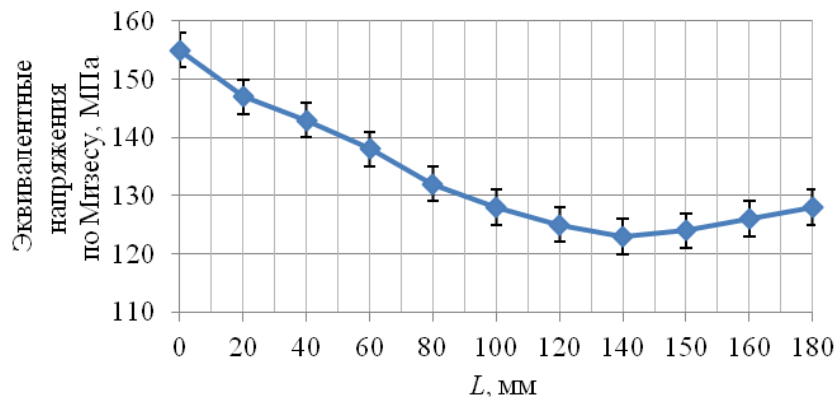


Рис. 7. Зависимость напряжений, возникающих в областях угловых соединений передней, задней и боковых стенок цистерны, от размера отступа горизонтальных ребер жесткости

На рис. 8, а представлен фрагмент «А» 3D-модели цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 с модернизированными ребрами жесткости на боковых стенках, а на рис. 8, б представлен то же фрагмент, на котором отражены результаты расчета напряженно-деформированного состояния.

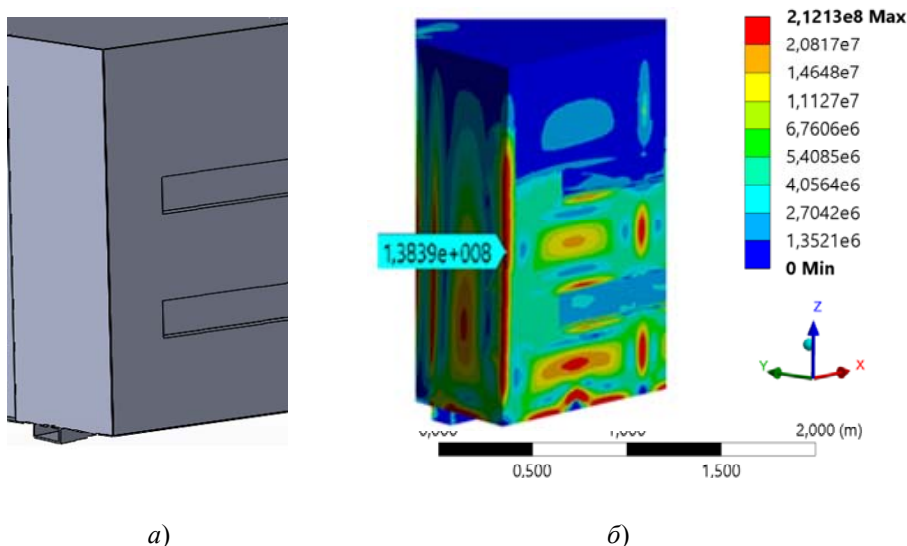


Рис. 8. Вид углового соединения передней и боковой стенок (фрагмент «А») 3D-модели цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 с модернизированными ребрами жесткости на боковых стенках (а) и результаты расчета напряженно-деформированного состояния (б), Па

На рис. 9 представлены результаты расчетов напряжений, возникающих в областях торцевых соединений поперечных волноломов и боковых стенок в зависимости от высоты  $H$  расположения ребер жесткости на боковых стенках.

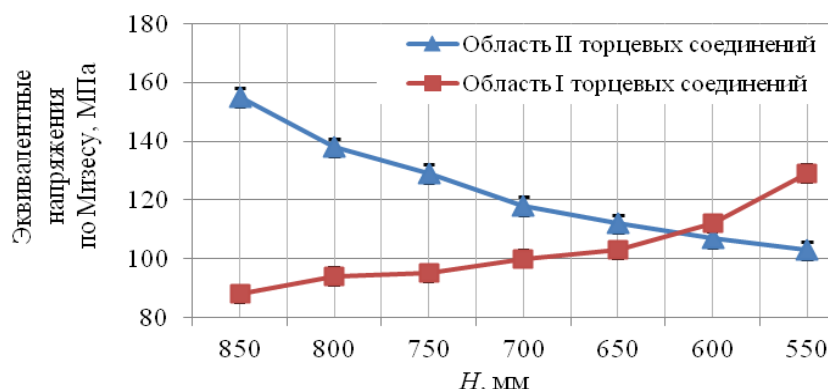


Рис. 9. Зависимость напряжений, возникающих в областях торцевых соединений поперечных волноломов и боковых стенок цистерны, от высоты расположения верхнего горизонтального ребра жесткости

В результате исследований установлено, что снижение высоты верхнего ребра жесткости со стандартной высотой  $H = 800$  мм до  $H = 650$  мм в модернизированной цистерне обеспечивает снижение уровня напряжений на 24–26 МПа, возникающих в областях II торцевых соединений поперечных волноломов и боковых стенок. При этом в областях I данных соединений рост напряжений составляет 9–11 МПа. Дальнейшее снижение высоты расположения верхнего ребра жесткости способствует критическому росту напряжений в областях I торцевых соединений поперечных волноломов и боковых стенок.

### Заключение

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости влияния характерных режимов (ускорение, торможение, поворот) и условий (скорость, вид дорожного покрытия) движения пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317 на значения ускорений, возникающих под действием инерционных нагрузок на поверхности конструкции цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$ . Полученные для каждого режима движения максимальные значения ускорений, которые составляют от 9,2 до 24,6  $\text{м/с}^2$ , использованы при конечно-элементном моделировании, что позволило адаптировать модели цистерн к натурным условиям эксплуатации и установить с высокой точностью уровень их нагруженности.

Разработаны новые конечно-элементные модели цистерны объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317, которые позволили исследовать характер формирования напряженно-деформированного состояния и установить уровень возникающих напряжений в наиболее нагруженных узлах конструкции при различных режимах движения пожарного автомобиля. Результаты расчета показали, что наибольшие напряжения возникают при движении пожарного автомобиля со скоростью 20–30 км/ч по проселочной дороге с чередующимися неровностями и перепадами высот.

Проведенные исследования позволили оптимизировать расположение (по критериям нагруженности и геометрических параметров) горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках цистерн объемом  $8 \text{ м}^3$  пожарного автомобиля на шасси МАЗ-6317. Установлено, что при выполнении горизонтальных ребер жесткости на боковых стенках цистерны без контакта с угловыми соединениями стенок конст-



рукции с отступом, равным  $L = 140$  мм от каждой стороны, а также при расположении верхнего ребра жесткости на боковой стенке на высоте  $H = 650$  мм от дна, обеспечивается снижение возникающих напряжений в областях угловых соединений стенок на 20–22 %, а также в областях торцевых соединений волноломов и боковых стенок на 17–18 %.

### Литература

1. Воронков, О. Ю. Пожарная техника : учеб. пособие : в 2 ч. / О. Ю. Воронков, С. Ф. Храпский ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – Ч. 1. – 96 с.
2. Shimanovsky, A. Modeling of Newtonian and Non-Newtonian liquid sloshing in road tanks while braking / A. Shimanovsky, M. Kuzniatsova, A. Sapietová // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 611. – P. 137–144.
3. A numerical study of the effects of the T-shaped baffles on liquid sloshing in horizontal elliptical tanks / W. Wang [et al.] // Ocean Engineering 111. – 2016. – P. 543–568.
4. Пуятто, А. В. Совершенствование элементов конструкций вагона-цистерны с учетом взаимодействия с перевозимым жидким грузом / А. В. Пуятто // Современ. технологии. Систем. анализ. Моделирование. – 2010. – № 1 (25). – С. 113–122.
5. Высоцкий, М. С. Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2006. – 320 с.
6. Chen, Y. Numerical Simulation of Liquid Sloshing with Different Filling Levels Using Open FOAM and Experimental Validation / Y. Chen, M.-A. Xue // Water. – 2018. – Vol. 10, № 12. – P. 1–18.
7. Методика динамического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструкций оболочечного типа. – Гомель : ГФ УГЗ МЧС РБ, 2017. – 10 с.
8. 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. – № 1. – Т. 2. – С. 81–90 (in Rus.).
9. Ковтун, В. А. Исследование влияния геометрических параметров элементов конструкции цистерны на ее прочностные характеристики при модернизации пожарных автомобилей / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 316–327.
10. AISI 430 сталь нержавеющая – характеристики. – Режим доступа: [https://emk24.ru/wiki/astm\\_standarty/astm\\_a240\\_2186585/](https://emk24.ru/wiki/astm_standarty/astm_a240_2186585/). – Дата доступа: 24.05.2021.

Получено 17.02.2022 г.