

УДК 614.846.63:004.94

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЦИСТЕРНЫ ПОЖАРНОГО АВТОМОБИЛЯ АЦ-5.0-50/4 НА БАЗЕ ШАССИ МАЗ-5337 МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

Проведены исследования напряженного состояния сварных швов пожарной автоцистерны АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 с применением подходов адаптивного компьютерного моделирования. По критерию прочности оптимизированы элементы существующей конструкции. На основе расчетов разработаны решения по модернизации конструкции цистерны пожарного автомобиля с целью повышения эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, цистерна, напряжение, коэффициент запас прочности, сварной шов, компьютерное моделирование, элементы конструкции.

(Поступила в редакцию 8 января 2019 г.)

Введение. Одной из тенденций, наблюдаемых при производстве современной техники, в том числе и пожарной аварийно-спасательной, является снижение материалоемкости при повышении нагрузочно-скоростных показателей. Так, при производстве пожарных автоцистерн получили распространение тонкостенные конструкции чемоданного сечения (рис. 1), применение которых позволило увеличить полезный объем емкости цистерны. При эксплуатации таких пожарных автомобилей, особенно в режимах разгона и торможения, а также при движении по пересеченной местности за счет перемещения жидкости относительно резервуара цистерны места сварных соединений конструктивных элементов подвергаются значительным повторно-переменным нагрузкам [1–3]. Результат действия данных нагрузок на сварные соединения проявляется в образовании и развитии трещин с последующим нарушением герметичности цистерн. Устранение указанных повреждений автоцистерны требует проведения трудоемких технологических операций, связанных с монтажно-демонтажными и сварочными работами, что ведет к длительному простоя техники и снижению боеспособности подразделения.

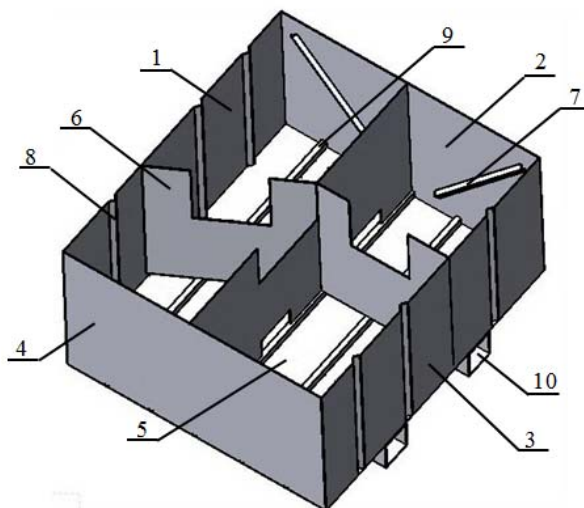


Рисунок 1. – Конструкция цистерны пожарного автомобиля (без верхней части):

- 1, 3 – передняя и задняя стенки цистерны; 2, 4 – боковые стенки цистерны, 5 – дно цистерны;
6 – волноломы (внутренние продольные и поперечные); 7, 8 – ребра жесткости;
9 – поперечные усиления в виде П-образных профилей; 10 – продольные лонжероны

Анализ записей в журналах учета технического обслуживания и ремонта техники производственно-технических центров Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, расположенных в Минске и Гомеле, за 2014–2017 гг. показал, что значительное количество пожарных автомобилей ремонтируются по причине нарушения герметичности цистерны [4]. С учетом того, что 90 % от выездов всей пожарной аварийно-

спасательной техники подразделений МЧС составляет выезд пожарных автоцистерн, можно отметить, что обеспечение эксплуатационной надежности пожарных автоцистерн является актуальным направлением исследования в целях повышения ресурса цистерн пожарных автомобилей, модернизации существующих и разработки новых конструктивных решений.

Одним из путей решения данной проблемы обеспечения необходимой эксплуатационной надежности пожарных автоцистерн является научно обоснованное изменение конструкции за счет применения дополнительных ребер жесткости. Однако определение необходимого количества ребер жесткости и выбор мест их установки при минимальном увеличении массы пожарного автомобиля является сложной технической задачей, решение которой требует значительных временных затрат.

Таким образом, цель работы состояла в повышении эксплуатационной надежности пожарных автоцистерн за счет усиления конструкции.

Методология проведения исследований. Для достижения поставленной цели работы был применен методологический подход, основанный на совокупном использовании результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования. Исследование напряженно-деформированного состояния цистерны пожарного автомобиля проведено с использованием методов компьютерного моделирования. Для расчетов применялся программный продукт ANSYS. В качестве исходных параметров моделирования использовались геометрические размеры деталей цистерны, физико-механические характеристики материалов и предварительно измеренные значения ускорения, возникающего при вибрации конструктивных элементов [5].

Для проведения эксперимента был выбран пожарный автомобиль с объемом цистерны 5 м³ на базе шасси МАЗ-5337 как наиболее распространенный в эксплуатации и уже вышедший из гарантийного периода обслуживания. Порядок проведения испытаний, разработки компьютерной модели и расчета в программном продукте ANSYS описаны в статьях [6, 7].

Результаты исследования. Согласно проведенным исследованиям, опубликованным в [6], максимальные нагрузки конструкция цистерны пожарного автомобиля испытывает при движении по проселочной дороге с неровностями при максимально возможной скорости (25 ± 5) км/ч. После проведения расчетов в программном комплексе ANSYS анализ распределения полей эквивалентных напряжений по Мизесу позволил установить области, испытывающие наибольшее напряженно-деформированное состояние [8, 9]. Расчетные значения максимальных зафиксированных эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны пожарного автомобиля на базе шасси МАЗ-5337 при данном режиме движения представлены в таблице 1. Также в таблице 1 представлены значения коэффициента запаса прочности в наиболее нагруженных местах цистерны, которыми являются сварные соединения, что позволяет судить о надежности конструкции и ее способности выдерживать нагрузки выше расчетных, а также о необходимости внесения изменений в конструкцию.

При этом необходимо отметить, что рекомендованные значения коэффициентов запаса прочности для пожарных автоцистр в литературе отсутствуют [10–13], а их выбор осуществляется на основе опыта эксплуатации аналогичных изделий и составляет 1,7–1,8. Также при определении допустимых напряжений для сварных швов используется понижающий коэффициент $\varphi = 0,8–0,85$, который учитывает, что в околошовной зоне снижаются механические характеристики основного металла [14], а доступными видами контроля сварных швов являются лишь визуальный и испытания гидростатическим давлением [15, 16].

Таблица 1. – Результаты исследования напряженного состояния сварных швов цистерны пожарного автомобиля на базе шасси МАЗ-5337 в заводском исполнении

Сварные швы в конструкции цистерны	Максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу, σ_{max} , МПа	Коэффициент запаса прочности, n
Угловые, соединяющие переднюю, заднюю и боковые стенки цистерны	145 ± 10	1,17
Торцевые, соединяющие волноломы со стенками цистерны	136 ± 9	1,23
Нахлесточное, крепящее ребра жесткости к боковым стенкам цистерны	148 ± 8	1,15

Исходя из вышеизложенного с целью обеспечения эксплуатационной надежности пожарных автоцистерн проведены проектные расчеты и разработаны следующие конструкторские решения. Для снижения возникающих напряжений в угловых сварных соединениях стенок цистерны пожарного автомобиля АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 и сварных соединениях волноломов к стенкам предложена дополнительная установка косынок, выполненных в различных исполнениях. На рисунке 2а представлена косынка в виде полосы, которая расположена в вертикальной плоскости под углом 45° к находящимся в контакте стенкам. На рисунке 2б представлена косынка в виде уголка с аналогичным расположением.

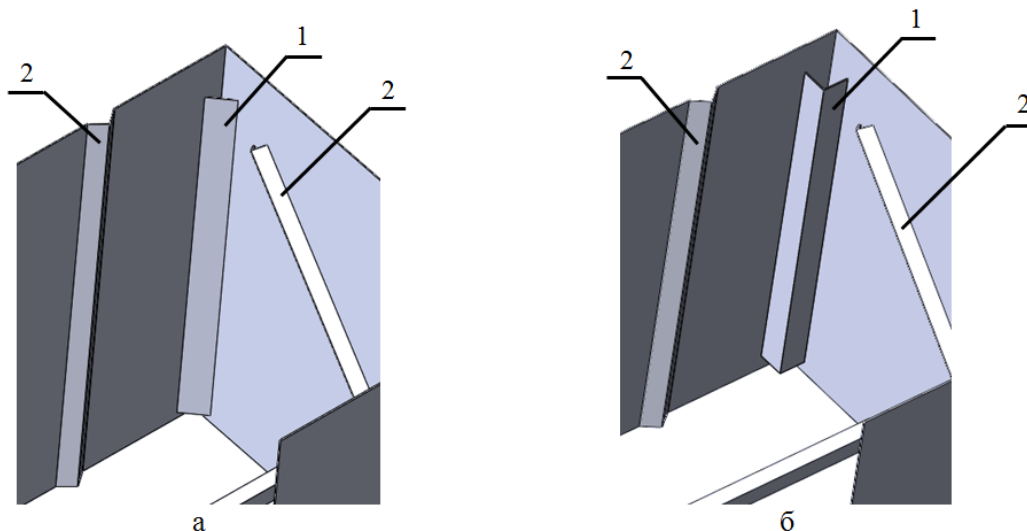


Рисунок 2. – Фрагмент углового сварного соединения боковой и задней стенок цистерны:
1 – косынка; 2 – ребра жесткости

На рисунке 3 показана зависимость возникающих при расчете значений эквивалентных напряжений по Мизесу от конструктивного исполнения косынки в виде полосы, усиливающей угловое сварное соединение цистерны. Оптимизируемыми параметрами косынки являлись длина и ширина при постоянной толщине. В результате сравнения результатов расчетов косынок в виде полосы различных размеров было установлено, что оптимальными геометрическими параметрами являются длина 900 мм и ширина 150 мм. Применение косынок данных размеров позволяет снизить напряжения в угловых сварных соединениях стенок цистерны на 21 % (29 ± 4 МПа).

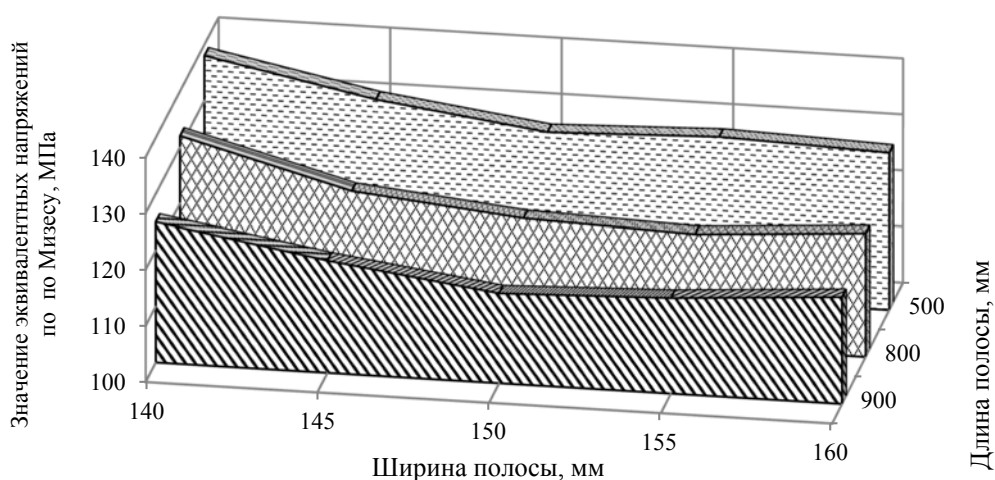


Рисунок 3. – Зависимость значений эквивалентных напряжений по Мизесу от конструктивных размеров косынки в виде полосы, устанавливаемой в угловых сварных соединениях стенок цистерны

Аналогичные расчеты, проведенные для косынки в виде уголка, показали снижение напряжений по Мизесу в угловых сварных соединениях стенок цистерны (рис. 4) только на

17 % (24 ± 4 МПа). Сравнительный анализ выполненных расчетов показал эффективность применения косынки в виде полосы.

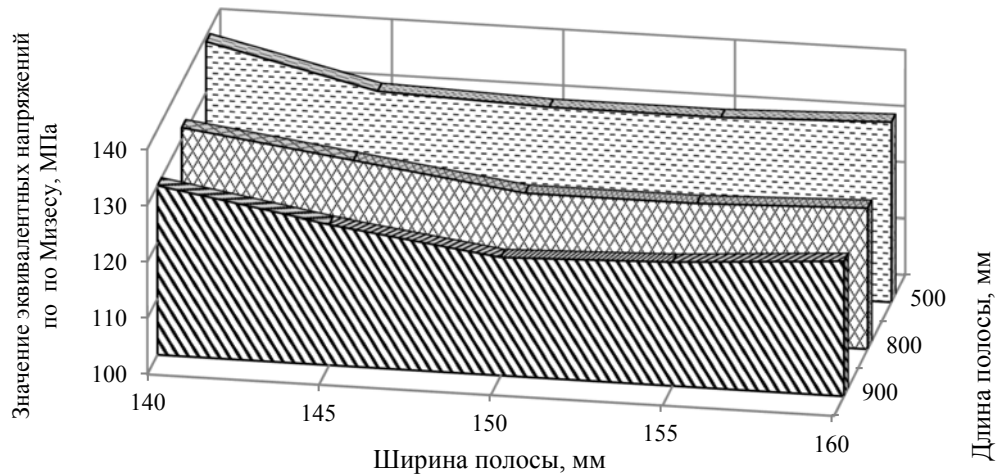
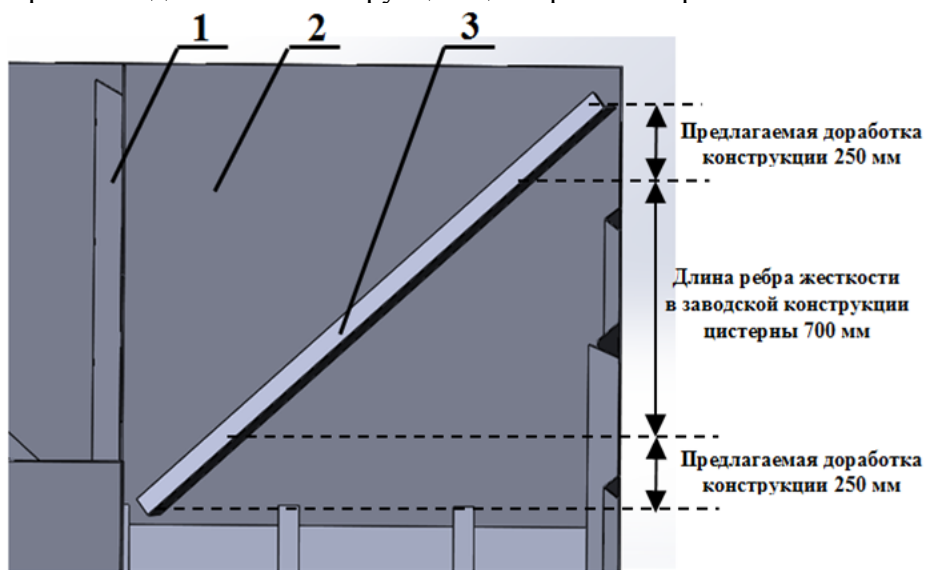


Рисунок 4. – Зависимость значений эквивалентных напряжений по Мизесу от конструктивных размеров косынки в виде уголка, устанавливаемой в угловых сварных соединениях стенок цистерны

Дальнейшие исследования влияния конструкции цистерны пожарного автомобиля АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 на ее напряженно-деформированное состояние показали необходимость увеличения длины ребер жесткости, установленных на боковых стенках (рис. 5). Зависимость значений эквивалентных напряжений по Мизесу от длины ребра жесткости, расположенного на боковых стенках цистерны, представлена на рисунке 6.

В результате проведенных расчетов было установлено, что увеличение длины ребра жесткости с 700 мм (заводское исполнение) до максимальной величины 1200 мм позволяет снизить возникающие эквивалентные напряжения по Мизесу в угловых сварных соединениях стенок цистерны на 7–11 МПа, что составляет порядка 5,5 %. Также установлено, что при этом снижаются значения эквивалентных напряжений по Мизесу в сварных соединениях волноломов и стенок цистерны на 10 % (14 ± 3 МПа), а также в местах крепления концевых участков ребер жесткости к боковым стенкам цистерны на 38 % (57 ± 5 МПа). При этом необходимо отметить, что при уменьшении длины ребра жесткости наблюдается резкое повышение значений эквивалентных напряжений по Мизесу в угловых сварных соединениях конструкции цистерны пожарного автомобиля.



1 – поперечный волнолом; 2 – боковая стенка цистерны; 3 – ребро жесткости

Рисунок 5. – Фрагмент внутреннего расположения ребра жесткости на передней и задней стенке цистерны

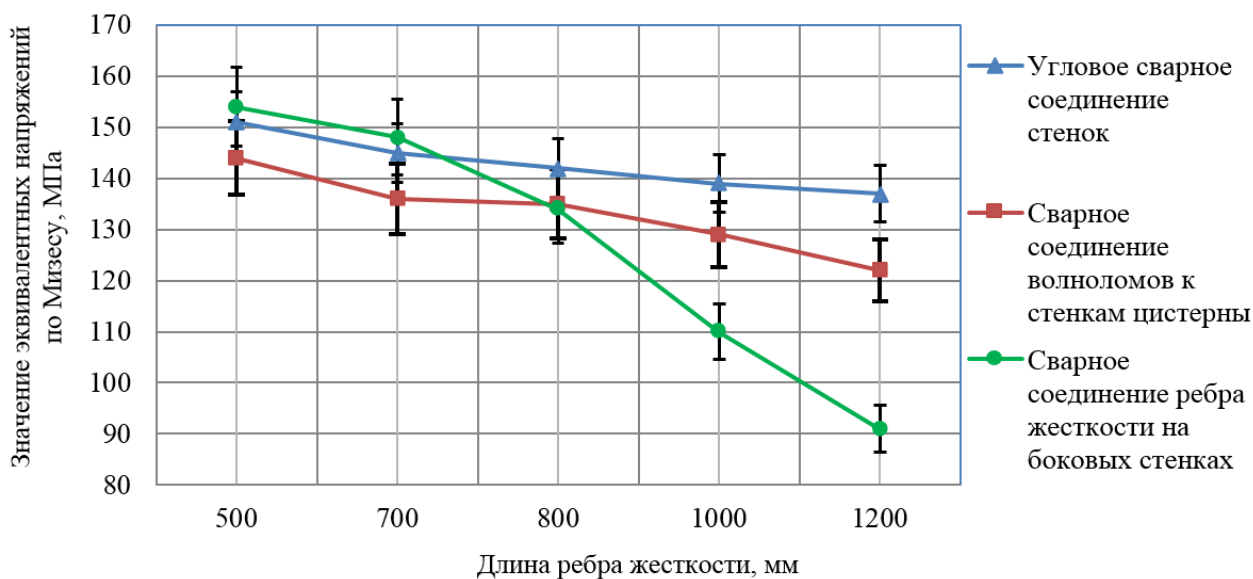


Рисунок 6. – Зависимость значений эквивалентных напряжений по Мизесу от длины ребра жесткости, установленного на боковых стенках цистерны

Результаты анализа расчетов напряженного состояния сварных швов исходной конструкции цистерны пожарного автомобиля (табл. 1) и модернизированной конструкции (табл. 2) показывают значительное снижение возникающих эквивалентных напряжений по Мизесу и, как следствие, повышение коэффициента запаса прочности. Проведенные исследования позволили разработать новые конструкторские решения для цистерн пожарных автомобилей, защищенные патентом Республики Беларусь [17].

Таблица 2. – Результаты исследования напряженного состояния сварных швов модернизированной цистерны пожарного автомобиля на базе шасси МАЗ-5337

Сварные швы в конструкции цистерны	Максимальные значения эквивалентных напряжений по Мизесу, σ_{max} , МПа	Коэффициент запаса прочности, n
Угловые, соединяющие переднюю, заднюю и боковые стенки цистерны	108 ± 6	1,56
Торцевые, соединяющие волноломы со стенками цистерны	122 ± 5	1,39
Нахлесточное, крепящее ребра жесткости к боковым стенкам цистерны	91 ± 5	1,87

Заключение. Методами компьютерного моделирования исследовано напряженное состояние сварных швов цистерны пожарного автомобиля. Установлены закономерности влияния размерных факторов конструктивных элементов на прочностные характеристики цистерны пожарного автомобиля и возникающее напряженно-деформированное состояние. На основе проведенных расчетов оптимизированы размеры деталей, усиливающих конструкцию цистерны пожарного автомобиля. Показано, что модернизация конструкции пожарной автоцистерны АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 позволяет повысить коэффициент запаса прочности на 25–30%. Таким образом, внедрение на практике результатов проведенных исследований позволит повысить эксплуатационную надежность пожарных автоцистерн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – Минск: Высшая школа, 1993. – 512 с.
2. Беспалько, С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / С.В. Беспалько. – М., 2000. – 427 л.
3. Механические и технологические свойства металлов. Справочник / А.В. Бобылев. – М.: Металлургия, 1980. – 296 с.
4. Короткевич, С.Г. Прогнозирование эксплуатационной надежности пожарных автоцистерн с применением подходов компьютерного моделирования / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун //

- Горение и проблемы тушения пожаров: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 5 июля 2017 г.: в 2 ч. / Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. – М., 2017. – Ч. 2. – С. 437–439.
5. Методика динамического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструкций оболочечного типа. – Введ. 24.07.2017. – Гомель: Гомельский фил. УГЗ МЧС Беларуси, 2017. – 8 с.
 6. Ковтун, В.А. Компьютерное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич, В.А. Жаранов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 81–90.
 7. Короткевич, С.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / С.Г. Короткевич, В.А. Ковтун // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 4 (25). – С. 45–51.
 8. Елисеев, К.В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах / К.В. Елисеев, Т.В. Зиновьева. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – 112 с.
 9. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева; под ред. А.В. Войтик. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
 10. Пояркова, К.В. Оценка дефектности структуры сварных соединений по наличию неметаллических включений [Электронный ресурс] / К.В. Пояркова, И.Р. Кузеев, К.Л. Забелин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – № 2 (5). – С. 32–35. – Режим доступа: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2017/2017-2.pdf>. – Дата доступа: 04.01.2019.
 11. Мяченков, В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / В.И. Мяченков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
 12. Хренов, К.К. Сварка, резка и пайка металлов: справочник / К.К. Хренов. – М.: Машгиз, 1952. – 384 с.
 13. Бенерджи, П.В. Методы граничных элементов в прикладных науках / П.В. Бенерджи, Р.И. Батгерфилд. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
 14. Детали машин в примерах и задачах: учеб. пособие / С.Н. Ничипорчик, М.И. Корженцевский, В.Ф. Калачев; под ред. С.Н. Ничипорчик. – 2-е изд. – М.: Высш. школа, 1981. – 186 с.
 15. Воропай, В.С. Экспериментальные исследования технического состояния вагонов-цистерн / В.С. Воропай // Сб. науч. работ ДонИЗТ. – 2010. – № 23. – С. 76–85.
 16. Головченко, В.И. Проверка прочности элементов крепления цистерны к шасси автоопливозаправщика от смещения при действии продольной нагрузки / В.И. Головченко, Н.Л. Иванина // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 1 (975) – С. 22–35.
 17. Пожарная цистерна: полез. модель ВУ 11787 / В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич, В.Н. Пасовец. – Оpubл. 30.10.2018.

OPTIMIZATION OF THE FIRE TRUCK'S TANK AC-5.0-50/4 BASED ON THE CHASSIS MAZ-5337 BY THE METHOD COMPUTER MODELING

Vadim 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», Gomel, Belarus

Siarhei Korotkevich

Vladimir Pasovets, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

The State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Ivan Todorov, Grand PhD, Associate Professor

Academy of the Ministry of Internal Affairs of Bulgaria, Sofia, Bulgaria

Purpose. One of the most relevant areas for research is the upgrade of existing and development of new structural solutions of the fire truck's tanks with the purpose of their operational safety improvement in fire rescue equipment.

Methods. The problem of determining the emerging stress-strain state in the construction of the fire truck's tank is solved by developing a calculated computer model and adapting it to operational modes of motion.

Findings. The dependence of the dimensional factors influence of structural elements installed in the fire truck's tank on the stress-strain state that occurs during operation was fixed. The optimum dimensions of the structural elements components were identified. The recommendations for the structural addition of fire truck's tanks AC-5.0-50/4 on the basis of the chassis MAZ-5337 were developed.

Application field of research. The presented results of the research were obtained in the field of strength properties of containers for the transportation of liquids and can be used in the repair and upgrading works of the relevant contractures.

Conclusions. The integration and practical complex implementation of the recommendations has improved the operational reliability of the fire truck's tank AC-5.0-50/4 on the basis of the chassis MAZ-5337 by more than 30 %, thereby increasing its overhaul period.

Keywords: fire truck, tank, dynamics, deformation, computer simulation, design, safety factor.

(The date of submitting: January 8, 2019)

REFERENCES

1. Bezukhov N.I. *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]. Moscow: Vysshaya shkola, 1993. 512 p. (rus)
2. Bespal'ko, S.V. *Razrabotka i analiz modeley povrezhdayushchikh vozdeystviy na kotly tsistern dlya perevozki kriogennykh produktov* [Development and analysis of models of damaging effects on the boilers of tanks for transportation of cryogenic products]. Grand PhD tech. sci. diss.: 05.22.07. Moscow, 2000. 427 p. (rus)
3. Bobylev A.V. *Mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoystva metallov* [Mechanical and technological properties of metals]: handbook. Moscow: Metallurgiya, 1980. 296 p. (rus)
4. Korotkevich S.G., Kovtun V.A. Prognozirovanie ekspluatatsionnoy nadezhnosti pozharnykh avtotsistern s primeneniem podkhodov komp'yuternogo modelirovaniya [Forecasting the operational reliability of fire tankers with the use of computer simulation]. *Proc. Intern. scientific-practical conf. «Goreniye i problemy tusheniya pozharov»*, Moscow, Juny 5, 2017. In 2 parts. Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2017. Part 2. Pp. 437–439. (rus)
5. *Metodika dinamicheskogo modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov i uzlov konstruktsiy obolochekhnogo tipa* [Methods of dynamic modeling of stress-strain state of elements and assemblies of shell type structures]. Gomel: Gomel branch UCP, 2017. p.8. (rus)
6. 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]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi*, 2018. No. 1. Pp. 81–90. (rus)

7. Korotkevich S.G., Kovtun V.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktivnykh tsistern pozharnykh avtomobiley [The research of strain-stress state of fire apparatus tanks construction]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii*, 2017. No. 4 (25). Pp. 45–51. (rus)
8. Eliseev K.V., Zinov'eva T.V. *Vychislitel'nyy praktikum v sovremennykh CAE-sistemakh* [Computational practice in modern SAE Systems]: tutorial. Saint Petersburg: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 2008. 112 p. (rus)
9. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva MA. *ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer]: tutorial. Moscow: Editorial URSS, 2003. 272 p. (rus)
10. Pojarkova K.V., Kuzeev I.R., Zabelin K.L. Otsenka defektnosti struktury svarynykh soedineniy po nalichiyu nemetallicheskiy vklyucheniy [Evaluation of defects in the structure of welded joints due to the presence of nonmetallic inclusions]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2017. No. 2 (5). Pp. 32–35, available at: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2017/2017-2.pdf> (accessed: January 4, 2019). (rus)
11. Mjachenkov V.I. et al. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruktivnykh metodom konechnykh elementov* [Calculations of engineering structures by the finite element method]: reference book. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 520 p. (rus)
12. Hrenov K.K. *Svarka, rezka i payka metallov* [Welding, cutting and soldering of metals]: reference book. Moscow: Mashgiz, 1952. 384 p. (rus)
13. Benerdzhii P.V., Batterfild R.I. *Metody granichnykh elementov v prikladnykh naukakh* [Boundary element methods in applied sciences]. Moscow: Mir, 1984. 494 p. (rus)
14. Nichiporchik S.N., Korzhentsevskiy, M.I., Kalachev V.F. *Detali mashin v primerakh i zadachakh*: [Machine parts in examples and tasks]: tutorial. Ed. by S.N. Nichiporchik. Moscow: Vyssh. shkola, 1981. 186 p. (rus)
15. Voropay V.S. Eksperimental'nye issledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya vagonov-tsistern [Experimental studies of the technical condition of tank wagons] *Sbornik nauchnykh rabot DonIIZT*, 2010. No. 23. Pp. 76–85 (rus)
16. Golovchenko V.I., Ivanina N.L. Proverka prochnosti elementov krepleniya tsisterny k shassi avtotoplivozapravshchika ot smeshcheniya pri deystvii prodol'noy nagruzki [Verification of the strength of the tank fastening elements to the chassis of the refueller against displacement under the action of a longitudinal load]. *Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu «KhPI»*, 2012. No. 1 (975). Pp. 22–35 (rus)
17. Kovtun V.A., Korotkevich S.G., Pasovets V.N. *Pozharnaya tsisterna* [Fire tank]: utility model BY 11787. Published October 30, 2018. (rus)