

УДК 004.94

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЦИСТЕРН ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**Ковтун В.А., Короткевич С.Г., Жаранов В.А.**

Разработана универсальная методика, позволяющая улучшить технологию проектирования и прогнозирования эксплуатационной надежности элементов и узлов конструкций оболочечного типа, предназначенных для перевозки различных жидкостей. Представлены результаты экспериментальных исследований и конечно-элементного динамического моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарного автомобиля на базе шасси МАЗ-5337. Показано, что результаты предложенных методологических подходов при проведении оценки напряженно-деформированного состояния позволяют получать достоверную информацию о надежности существующих изделий оболочечного типа и разрабатывать новые конструкции с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: автоцистерны, динамика, датчики, ускорение, деформация, компьютерное моделирование, проектирование, оптимизация конструкций.

(Поступила в редакцию 11 января 2018 г.)

Введение. Емкости с жидкостью являются неотъемлемой составной частью многих современных объектов транспортного машиностроения, авиационной и ракетно-космической техники. Сложившаяся в настоящее время тенденция повышения полезного объема при одновременном снижении материалоемкости за счет использования тонкостенных конструкций приводит к существенному повышению уровня напряженно-деформированного состояния и требует при проектировании высокой точности инженерных расчетов. Известно, что при эксплуатации конструкций оболочечного типа, содержащих полости, заполненные жидкостью, интенсивные внешние, в том числе ударные, воздействия приводят к появлению колебаний жидкости, сопровождающихся различными нелинейными эффектами, которые оказывают существенное влияние на динамику конструкции. Это приводит к снижению продольной и поперечной устойчивости, увеличивает нагрузки и, как следствие, нарушает целостность конструкций. При эксплуатации пожарных автомобилей особенно важно соблюдение повышенных требований к прочности конструкции цистерны для воды. Это обусловлено необходимостью следовать к месту вызова на пожар не только по асфальтированным дорогам, но и по пересеченной местности. Часто пожары возникают в лесах, кустарниках, торфяниках, подъезд к которым затруднен отсутствием ровного дорожного покрытия для крупногабаритной техники. В данных условиях при движении корпус испытывает динамические воздействия в различных направлениях, что передает значительные, нередко критические нагрузки на места сварки и ребра жесткости конструкции цистерны [1]. В результате в процессе эксплуатации начинают появляться трещины в местах соединения перегородок (волноломов) с оболочкой резервуара, а также угловых местах сварки стенок конструкции. Устранение возникающих повреждений требует большого объема подготовительных и ремонтных работ, которые ведут к длительному простоем техники. Целостность резервуара, как основной конструктивной составляющей пожарной автоцистерны, определяет постоянную готовность ее к боевому выезду.

При эксплуатации цистерн, транспортирующих жидкость, наиболее надежной формой конструкции является цилиндрическая. Это обусловлено тем, что при производстве используется меньше сварных соединений, а возникающее при движении динамическое давление, как правило, направлено радиально. При производстве пожарных автомобилей округлые формы цистерн не позволяют рационально использовать пространство под совместно перевозимое различное аварийно-спасательное оборудование, количество которого превышает 100 наименований, а также увеличить объем перевозимой огнетушащей жидкости, необходимой при тушении пожаров. По этой причине был осуществлен переход на тонкостенные конструкции цистерн прямоугольного сечения. При движении в таких конструкциях динамические воздействия направлены перпендикулярно стенке, металл работает на изгиб или на сдвиг. В связи с этим, чтобы обеспечить необходимую надежность конструкции, требуется утолщать стенки или вводить ребра жесткости, что приводит к недо-

пустимому утяжелению конструкции. Вблизи мест соединения частей оболочек, а также других мест резкого изменения их формы возникает значительная концентрация напряжений. Поэтому выбор мест установки ребер жесткости, основанный на научно-исследовательских подходах, позволит значительно увеличить срок эксплуатации конструкции. Этими обстоятельствами и объясняется то большое внимание, которое уделяется теории тонкостенных систем, методам их расчета и численной реализации этих методов.

Решение задач динамики движения твердого тела в полости, заполненной жидкостью, значительно усложняется в связи с необходимостью составления и решения полных нелинейных уравнений движения [2]. При этом требуется применять численные методы с учетом наличия разрывных решений, обусловленных нелинейностью и гиперболичностью уравнений, или аналитические методы со специальными условиями, которые описаны в исследованиях различных ученых. Наличие препятствий, которыми и являются устройства гашения колебаний жидкости в полости, ведет к образованию вертикальной неоднородности течения. Аналитическое решение названных уравнений до настоящего времени не получено, определение напряжений возможно только для достаточно простых конструкций. Поиск решения обуславливает необходимость внесения значительных упрощений в модель. В противном случае применение данных методов совместно с теорией упругости к расчету напряженно-деформированного состояния цистерны приводит к сложному математическому аппарату вычислений [3–5]. Выполненный анализ показывает актуальность разработки универсального современного подхода в решении нелинейных задач напряженно-деформированного состояния данных конструкций.

Одним из решений проблемы оценки надежности проектируемой конструкции оболочечного типа является применение специализированного программного обеспечения, позволяющего на этапе проектирования моделировать все этапы производства и эксплуатации изделий, минимизировать количество физических испытаний многочисленных прототипов в процессе разработки. Главное преимущество численных методов заключается в том, что они являются универсальными по отношению к вариациям исходной силовой и геометрической информации и позволяют быстро выполнять анализ воздействия разнообразных определяющих переменных (геометрических, видов нагружения, особенностей структуры и свойств) на состояние механической системы [6–9]. При таком подходе значительно сокращается время, затрачиваемое на разработку проекта, что является современным и экономически выгодным решением.

Таким образом, целью данной работы является разработка универсальной методики с использованием возможностей компьютерного моделирования для проведения проектных расчетов и исследования прочностных свойств емкостей для жидкостей оболочечного типа, в частности конструкций пожарных автоцистерн, с учетом реально возникающих нагрузок при движении с различным рельефом местности.

Методология проведения исследований. В работе предложен новый методологический подход, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние конструкции цистерны в зависимости от различных эксплуатационных режимов. Разработанная методика основана на совокупном использовании экспериментального подхода и компьютерного моделирования. Задача динамического моделирования напряженно-деформированного состояния решается при помощи разработки расчетной компьютерной модели и адаптации ее к эксплуатационным режимам движения путем применения в настройках экспериментально полученного значения максимального ускорения колебаний элементов контролируемой конструкции.

Для проведения эксперимента была выбрана модель пожарной автоцистерны пятитонного водоизмещения на базе шасси МАЗ-5337, которая по результатам проведенного анализа в производственно-технических центрах г. Минска и г. Гомеля наиболее часто подвергается ремонту по причине появления течи в конструкции емкости для жидкости. Необходимые измерения проводились с использованием анализатора шума и вибрации «Ларсон Дэвис 2900» (частотный диапазон входного фильтра – от 1 до 10 000 Гц) и 6 датчиков вибрации 352С18 (частотный диапазон $\pm 5\%$ – от 1 до 12 000 Гц). Места установки датчиков на боковой, передней и нижней стенке цистерны определялись путем проведения замеров на равноудаленное расстояние от сварных швов, ребер жесткости и иных конструктивных элементов, влияющих на жесткость конструкции. Необходимые измерения были проведены в следующих режимах:

– режим 1: движение по прямому участку ровной асфальтированной дороги со скоростью 50 км/ч;

- режим 2: движение по проселочной 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.

Существуют различные параметры, характеризующие измеряемую вибрацию: скорость колебаний, период колебаний, ускорение колебаний и др. Эквивалентные значения данных параметров получают путем решения логарифмических уравнений, заложенных в программном обеспечении измерительного оборудования. Результаты возникающих эквивалентных ускорений за контрольный промежуток времени при заданных режимах движения пожарной автоцистерны показаны на рисунках 1–4, которые были получены из специального программного обеспечения после проведения измерений и обработки данных анализатором шума и вибрации «Ларсон Дэвис 2900».

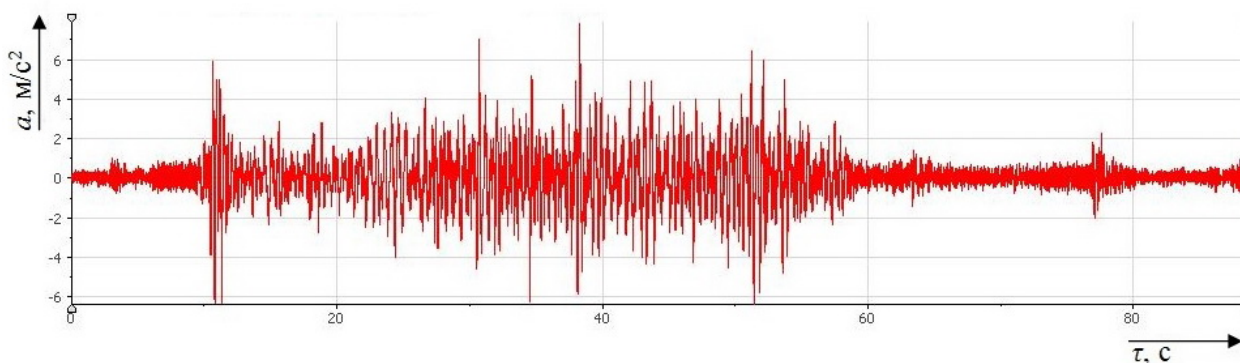


Рисунок 1. – Результаты экспериментальных измерений при движении автоцистерны по прямому участку ровной асфальтированной дороги со скоростью 50 км/ч

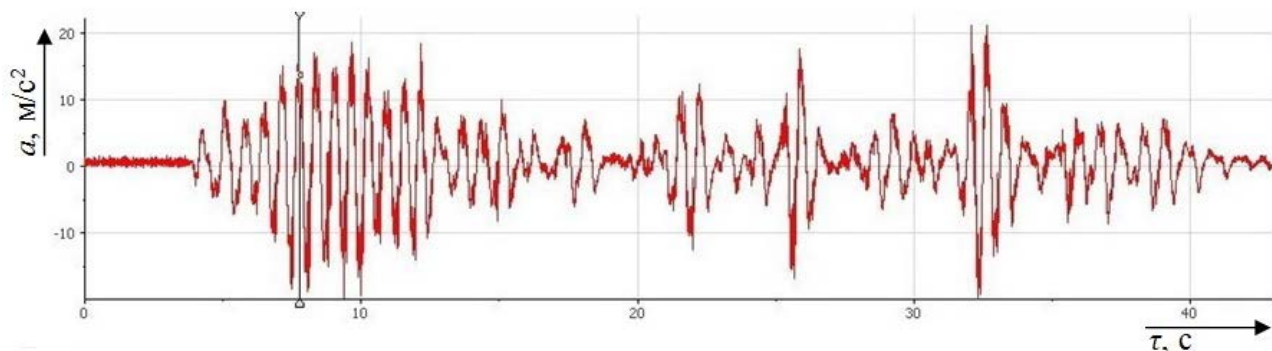


Рисунок 2. – Результаты экспериментальных измерений при движении автоцистерны по проселочной дороге с неровностями со скоростью 20–30 км/ч

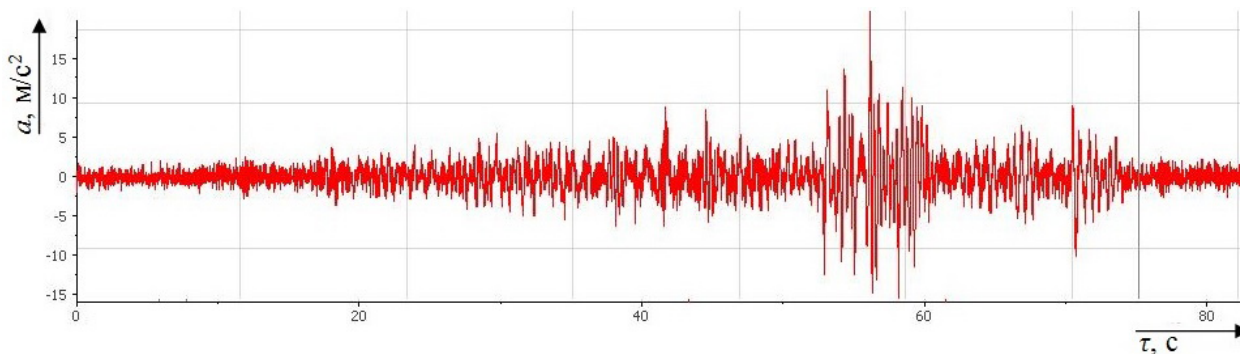


Рисунок 3. – Результаты экспериментальных измерений при выезде автоцистерны с разворотом со скоростью 10–15 км/ч

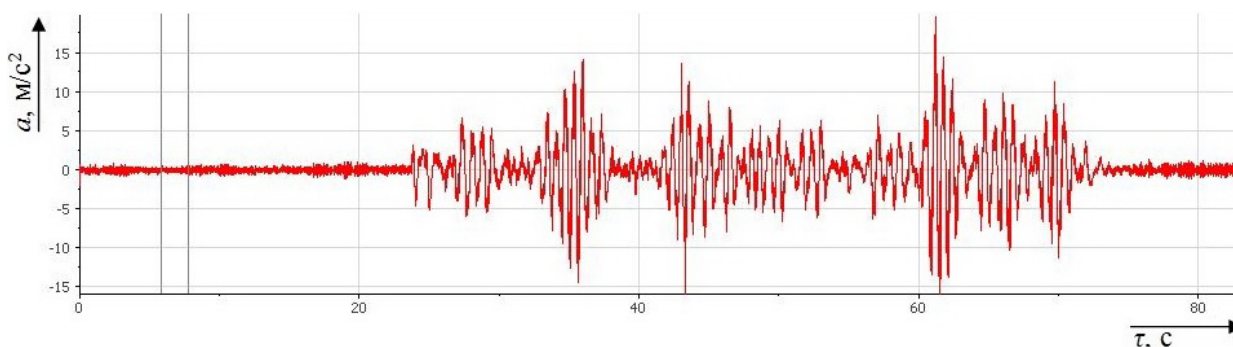


Рисунок 4. – Результаты экспериментальных измерений при движении с ускорением автоцистерны с места до скорости 30 км/ч и торможении

В таблице 1 представлены максимальные (по модулю) значения ускорений, зафиксированные по результатам измерений в заданных режимах движения.

Таблица 1. – Максимальные (по модулю) значения ускорений

Режим	Максимальное значение ускорения (после обработки фильтром 30 Гц), м/с ²					
	датчик 1, передняя стенка цистерны	датчик 2, передняя стенка цистерны	датчик 3, боковая стенка цистерны	датчик 4, боковая стенка цистерны	датчик 5, нижняя стенка цистерны	датчик 6, нижняя стенка цистерны
Режим 1	5,7	6,2	6,8	6,6	7,4	6,1
Режим 2	20,2	22,3	21,9	21,8	14,4	15,3
Режим 3	17,7	17,4	17,2	17,9	10,2	8,8
Режим 4	15,1	15,8	14,9	15,6	9,7	9,9

Проведя сравнительный анализ полученных измерений, представленных на рисунках 1–2, можно сделать вывод о том, что при движении по ровной асфальтированной дороге значительных колебаний жидкости не возникает, при этом при движении по проселочной дороге от воздействия различных неровностей разность нагрузок на стенки цистерны с жидкостью возрастает более чем в 3 раза. Сравнительный анализ полученных измерений, представленных на рисунках 3–4, показал, что значения возникающей нагрузки на 20–29 % меньше, чем при движении по проселочной дороге, однако оно также оказывает существенное воздействие на напряженно-деформированное состояние конструкции автоцистерны. Следует отметить, что ежедневная эксплуатация, связанная с необходимостью быстрого следования к месту вызова, оказывает значительные усталостные воздействия на конструкцию в режимах «ускорение», «торможение», «поворот».

Компьютерное моделирование и обсуждение результатов. Создание расчетной модели цистерны пожарного автомобиля АЦ-5.0-50(5337)А2 в масштабе 1:1 проводилось в программном комплексе SolidWorks. Цистерна состоит из передней, задней, боковых, нижней и верхней стенок. К нижней стенке цистерны приварены два лонжерона и шесть кронштейнов с установленными резиновыми сайлентблоками. Внутри цистерны расположены ребра жесткости и волноломы. По результатам проведенного анализа ремонтируемых автоцистерн на рисунке 5 отмечены места, подверженные появлению течи в процессе эксплуатации. Далее для проведения расчетов созданная модель импортировалась в программный комплекс ANSYS. Решение любой задачи методом численного моделирования предполагает разбиение расчетной области на дискретные элементы. Именно в узлах сетки определяются значения искомых переменных и накладываются граничные условия задачи [10, 11]. Для решения задач в области исследования напряженно-деформированного состояния конструкций оболочечного типа оптимальным решением формы элемента дискретизации был принят гексаэдр, это позволило ускорить процесс расчета, повысить его сходимость (точность) и устойчивость (рисунок 6). В расчете использованы следующие механические характеристики нержавеющей стали марки AISI 430 2В: модуль упругости $E = 206$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7700$ кг/м³, предел текучести $\sigma_m = 200$ МПа, предел прочности $\sigma_n = 460$ МПа [12]. На рисунке 6 построенная конечно-элементная модель содержит 374849 узлов и 317603 элементов. Толщина стенок цистерны выполнена из листа металла толщиной 3 мм, а дно – толщиной 4 мм.

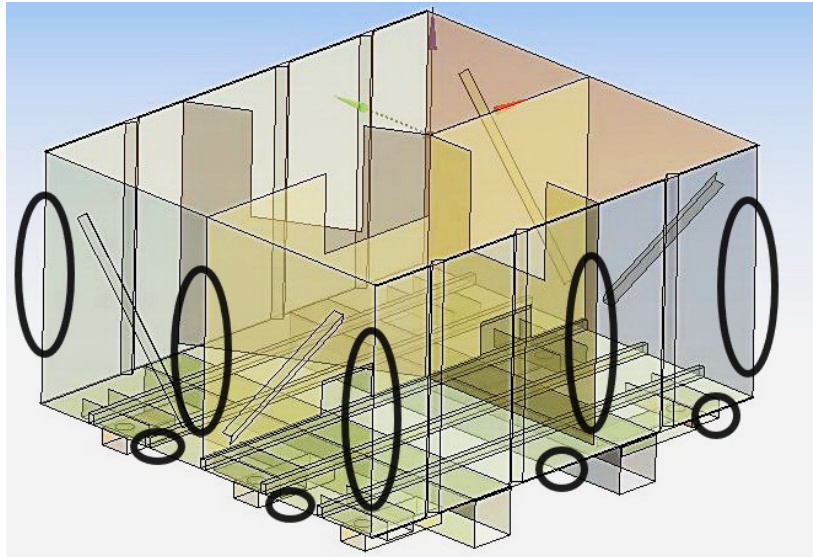


Рисунок 5. – 3D модель цистерны АЦ-5.0(5337)А2

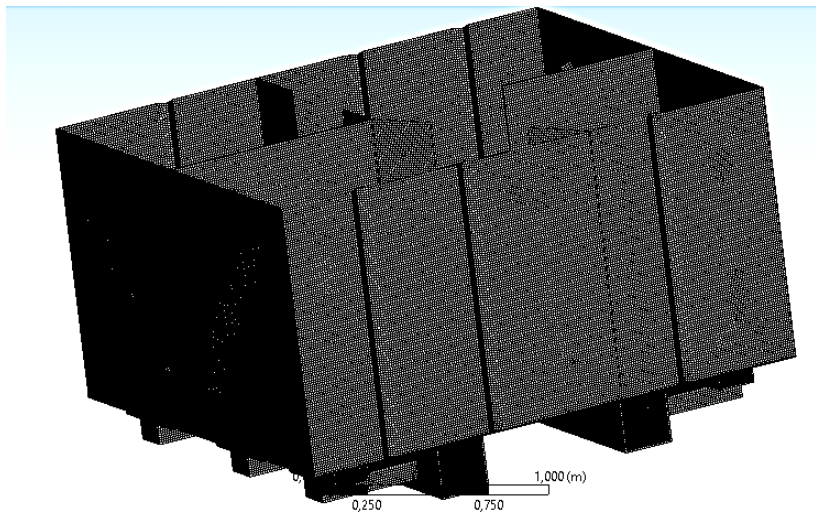


Рисунок 6. – Наложение конечно-элементной сетки дискретизации для проведения расчетов 3D модели цистерны

Для имитации заполнения цистерны водой программно задается гидростатическое давление на ее стенки с учетом направления вектора действующей силы (рисунки 7 и 8) и плотности жидкости (1000 кг/м^3).

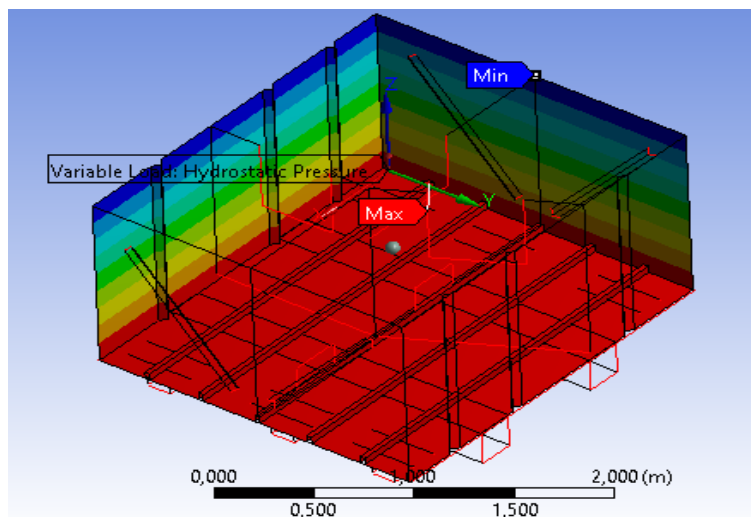


Рисунок 7. – Модель гидростатического нагружения цистерны (режим движения)

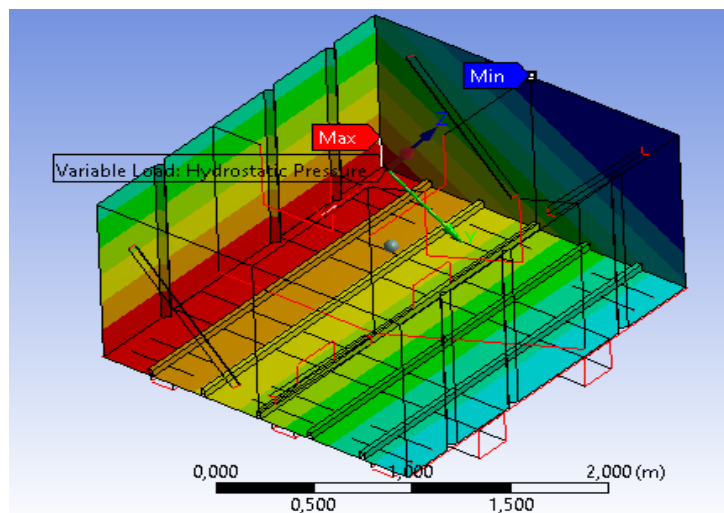


Рисунок 8. – Модель гидростатического нагружения цистерны (режим торможения)

В целях получения значений возникающих механических напряжений, которые испытывает при движении конструкция цистерны, проведен расчет для режима с максимальным (по модулю) значением ускорения ($a = 22,3 \text{ м/с}^2$), которое было зафиксировано при движении автоцистерны по проселочной дороге с неровностями со скоростью 20–30 км/ч (см. таблицу 1). После ввода в параметрах настройки «Hydrostatik Acceleration» значения ускорения во вкладке «Equivalent Stress» был произведен расчет эквивалентных напряжений по Мизесу и получены картины распределения полей напряженно-деформированного состояния конструкции цистерны (рисунки 9 и 10). В качестве допущения было принято, что векторное направление силы действия гидростатического давления в данном режиме движения направлено вертикально вниз.

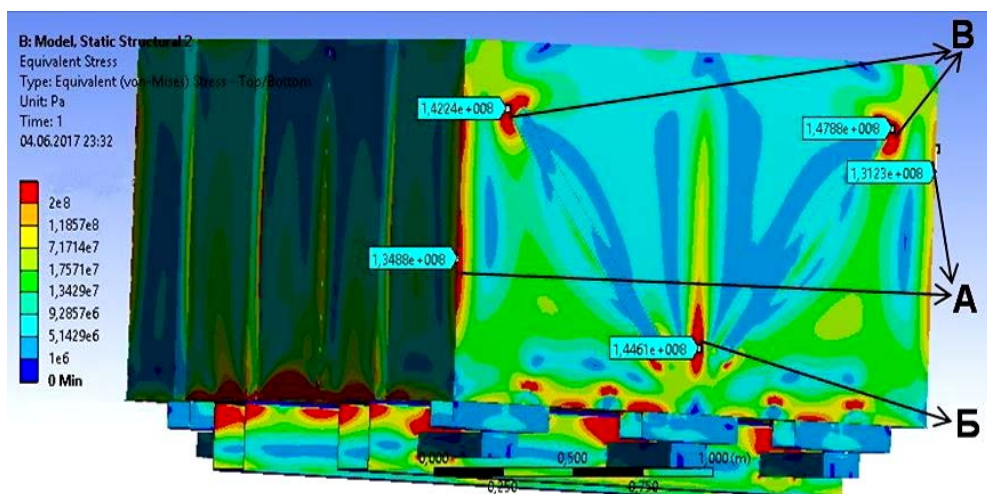


Рисунок 9. – Модель распределения полей эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны (вид сбоку)

Анализ результатов, представленных на рисунках 9 и 10, позволил определить места возникновения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу:

- в зонах А (угловые местах сварки) $\sigma_{max} = 130 \div 139 \text{ МПа}$, коэффициент запаса прочности с учетом снижения механических характеристик от сварных швов $n = 1,23$;
- в зоне Б (крепление волнолома к стенке цистерны) $\sigma_{max} = 135 \div 145 \text{ МПа}$, коэффициент запаса прочности с учетом снижения механических характеристик от сварных швов $n = 1,17$;
- в зоне В (крепление уголка к стенке цистерны) $\sigma_{max} = 140 \div 148 \text{ МПа}$, коэффициент запаса прочности с учетом снижения механических характеристик от сварных швов $n = 1,15$;
- в зоне Г (крепление дна цистерны к боковой стенке) $\sigma_{max} = 147 \div 156 \text{ МПа}$, коэффициент запаса прочности с учетом снижения механических характеристик от сварных швов $n = 1,08$.

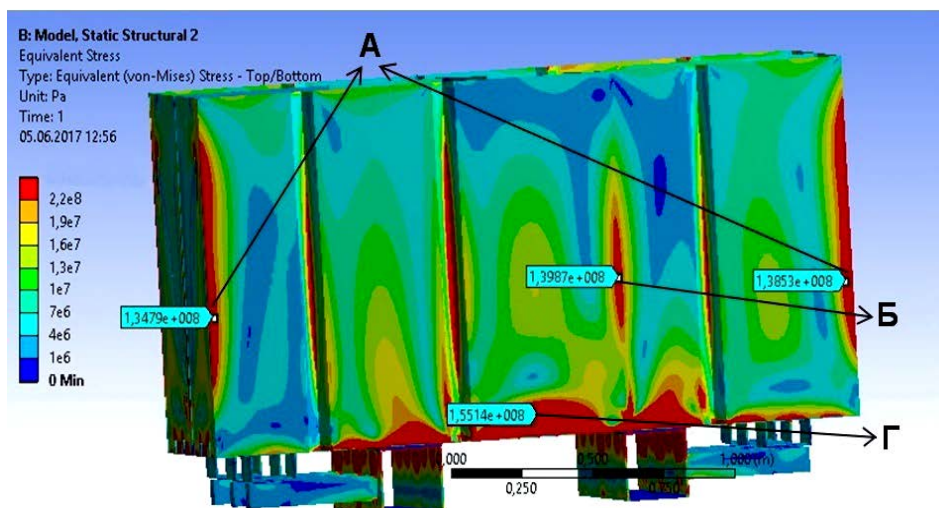


Рисунок 10. – Модель распределения полей эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны (вид спереди)

Согласно технической документации и производственным стандартам качества, при проектировании конструкций подобного типа необходимо учитывать коэффициент запаса прочности с учетом снижения механических характеристик от сварных швов, который для конструкций цистерн в большинстве случаев принимается равным 1,5 по отношению к гарантированному пределу прочности выбранного типа стали [13–15]. В результате было установлено, что коэффициент запаса прочности конструкции в местах возникновения максимальных эквивалентных напряжений по результатам расчетов при различных режимах эксплуатации оказался значительно ниже. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в процессе эксплуатации данной модели автоцистерны при воздействии возникающих динамических нагрузок будет происходить значительная деформация конструкции емкости для жидкости с нарушением целостности и герметичности.

Проведение подробного анализа результатов компьютерного моделирования еще на стадии проектирования позволяет оценить и спрогнозировать состояние расчетной конструкции в зависимости от различных режимов эксплуатации, а также дает возможность разрабатывать необходимые конструкционные изменения. Предложенный методологический подход и разработанная методика, опирающиеся на научно обоснованные подходы к прогнозированию состояния конструкций пожарных автоцистерн, могут быть использованы для решения задач по повышению эксплуатационной надежности для различных емкостей оболочечного типа.

Заключение. По данным проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Разработана методика, позволяющая улучшить технологию проектирования элементов и узлов конструкций оболочечного типа. Особенностью предложенной методики является совместное использование результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования. Результаты конечно-элементного расчета в программном комплексе ANSYS с учетом полученных значений возникающих ускорений позволяют с достаточной точностью говорить об уровне воздействия перевозимой жидкости на конструкцию цистерны и возникающих динамических нагрузках в зависимости от различных эксплуатационных режимов движения. Разработана адаптивная конечно-элементная модель, позволяющая проводить исследования напряженно-деформированного состояния емкости для жидкости пожарной автоцистерны. Анализ распределения полей эквивалентных напряжений по Мизесу в конструкции цистерны показал области с максимальными значениями нагрузок. Полученные результаты имеют высокую степень корреляции с данными о проблемных местах соответствующих конструкций, предоставленными производственно-техническими центрами МЧС г. Минска и г. Гомеля, осуществляющими ремонт пожарных автоцистерн. Представленные результаты получены в области исследований прочностных свойств и могут быть использованы при ремонте с целью оптимизации конструкций корпусов и опор крепления емкостей для жидкостей оболочечного типа, а также при проектировании новых образцов спецтехники, в частности конструкций автоцистерн пожарных автомобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомаз, Г.И. Колебания жидкости в баках. Методы и результаты экспериментальных исследований / Г.И. Богомаз, С.А. Сирота. – Днепропетровск: Ин-т технической механики НАН Украины и НКА Украины. – 2002. – 306 с.
2. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
3. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – Минск: Высшая школа, 1993. – 512 с.
4. Корниенко, Н.А. Применение уравнений в частных производных для определения частот собственных колебаний жидкого груза в котле железнодорожной цистерны / Н.А. Корниенко, С.В. Беспалько, В.И. Богачев. – М.: МИИТ, 2010. – 7 с.
5. Петросян, А.С. Дополнительные главы гидродинамики тяжелой жидкости со свободной границей / А.С. Петросян. – М.: ИКИ РАН, 2010. – 127 с.
6. Богомаз, Г.И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / Г.И. Богомаз. – Киев: Наукова думка, 2004. – 224 с.
7. Головченко, В.И. Основные положения расчета крепления цистерны к шасси автомобиля автоопливозаправщика / В.И. Головченко, Н.Л. Иванина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 22. – С. 40–47.
8. 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. – Москва: ВНИИПО, 2017. – Ч. 2. – С. 437–439.
9. Шимановский, А.О. Моделирование перетекания жидкости в резервуаре с использованием программных комплексов ANSYS и STAR-CD / А.О. Шимановский, А.В. Путьто // Вестник Уральского гос. технического ун-та. – УПИ. Компьютерный инженерный анализ. – 2005. – № 11 (63). – С. 103–110.
10. Елисеев, К.В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах / К.В. Елисеев, Т.В. Зиновьева // Компьютерное моделирование. – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2008. – С. 36–54.
11. 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.
12. Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://splav-kharkov.com>. – Дата доступа: 20.07.2017.
13. Мяченков, В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В. И. Мяченков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
14. Бенерджи, П.В. Методы граничных элементов в прикладных науках / П.В. Бенерджи, Р.И. Баттерфилд. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
15. 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 с.

COMPUTER SIMULATION AND RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF FIRE TANK TRUCK CONSTRUCTION

Vadim Kovtun, Grand PhD in Technical Sciences, Professor

Siarhei Korotkevich

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Vitaly Zharanov

Educational Establishment «Sukhoi State Technical University of Gomel», Gomel, Belarus

Purpose. There is a necessity in universal methodology developed for assessing the stress-strain state of a fire truck construction, taking into account the factors influencing the character of the dynamic process.

Methods. The studies were carried out with a help of modern computational software complex, along with high-precision instruments and equipment with the installation of special sensors on essential places of construction for monitoring.

Findings. The developed methodology render possible to improve the technology of elements and units design of shell type. The peculiarity of this methodology is in the combined usage of the of experimental measurements and computer simulation results.

Application field of research. The supplied research results are obtained in the field of strength properties of shells and can be used in repair works for the purpose of optimization of shell construction and fixing supports for liquids containers, as well as for the design of new samples of special equipment, in particular strength elements of tank trucks for fire trucks.

Conclusions. A detailed analysis of the obtained results allows to develop constructional changes for the improvement of fire truck exploitation.

Keywords: tank truck, dynamics, sensors, acceleration, deformation, computer modeling, research, engineering design, structural optimization.

(The date of submitting: January 11, 2018)

REFERENCES

1. Bogomaz G.I., Sirota S.A. *Kolebaniya zhidkosti v bakakh. Metody i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy* [Fluctuations of liquid in tanks. Methods and results of experimental studies]. Dnepropetrovsk: Institut tekhnicheskoy mekhaniki NAN Ukrainy i NKA Ukrainy, 2002. 306 p. (rus)
2. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1986.p.560 (rus)
3. 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)
4. Kornienko N.A., Bepal'ko S.V., Bogachev V.I. *Primenenie uravneniy v chastnykh proizvodnykh dlya opredeleniya chastot sobstvennykh kolebaniy zhidkogo gruzha v kotle zheleznodorozhnoy tsisterny* [Application of solutions in partial derivatives for determining the speeds of movement of liquid cargo in a cauldron of a railway tank]. Moscow: MIIT, 2010.7 p. (rus)
5. Petrosyan A.S. *Dopolnitel'nye glavy gidrodinamiki tyazheloy zhidkosti so svobodnoy granitse* [Additional chapters of the hydrodynamics of a heavy fluid with a free boundary]. Moscow: IKI RAN. 2010. 127 p. (rus)
6. Bogomaz G.I. *Dinamika zheleznodorozhnykh vagonov-tsistern* [Dynamics of railway tank wagons] Kiev: Naukova dumka, 2004. 224 p. (rus)
7. Golovchenko V.I., Ivanina N.L. *Osnovnye polozheniya rascheta krepleniya tsisterny k shassi avtomobilya avtotoplivozapravshchika* [The main provisions for calculating the mounting of a tank to the chassis of an auto fueler's car]. *Vestnik NTU «KhPI»*, 2012. No. 22. Pp. 40–47. (rus)
8. 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. «Gorenie i problemy tusheniya pozharov»*. Moscow: VNIPO, 2017. Part 1. Pp. 437–439. (rus)
9. Shimanovskiy A.O., Putyato A.V. *Modelirovanie peretekaniya zhidkosti v rezervuare s ispol'zovaniem programmnykh kompleksov ANSYS i STAR-CD* [Modeling of fluid flow in the reservoir using ANSYS and STAR-CD software complexes]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. UPI. Komp'yuternyy inzhenernyy analiz*, 2005. No. 11 (63). Pp. 103–110. (rus)

10. Eliseev K.V., Vychislitel'nyy T.V. praktikum v sovremennykh CAE-sistemakh [Computational practice in modern SAE Systems]. *Komp'yuternoe modelirovanie*. St. Petersburg Polytechnic University, 2008. Pp. 36–54. (rus)
11. Kaplun A.B., Morozov E.M. *Olfer'eva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer: a practical guide]. Moscow: Editorial URSS, 2003. 272 p. (rus)
12. *Marochnik stali i splavov* [Stamp steel and alloys], available at <http://splav-kharkov.com> (accessed: November 20, 2017). (rus)
13. Myachenkov V.I. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruksiy metodom konechnykh elementov: Spravochnik* [Calculations of engineering structures by the finite element method: reference book]. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 520 p. (rus)
14. Benerdzhii P.V., Batterfild R.I. *Metody granichnykh elementov v prikladnykh naukakh* [Boundary element methods in applied sciences]. Moscow, 1984. 494 p. (rus)
15. Bespal'ko S.V. *Razrabotka i analiz modeley povrezhdayushchikh vozdeystviy na kotly tsistem 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. Synopsis: 05.22.07. Moscow, 2000. 427 p. (rus)