

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

УДК 629.01:531.39

**КУЗНЕЦОВА
Марина Григорьевна**

**ДИНАМИКА ЦИСТЕРН
СО СПЛОШНЫМИ И ПЕРФОРИРОВАННЫМИ
ПЕРЕГОРОДКАМИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ
ЖИДКОСТЕЙ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность
машин, приборов и аппаратуры**

Гомель, 2014

Работа выполнена в УО «Белорусский государственный университет транспорта»

Научный руководитель Шимановский Александр Олегович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика» УО «БелГУТ», г. Гомель.

Официальные оппоненты: Шабловский Олег Никифорович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика» УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», г. Гомель;

Шмелев Алексей Васильевич – кандидат технических наук, директор Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск.

Оппонирующая организация – УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Защита состоится «12» декабря 2014 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.27.01 при УО «БелГУТ» по адресу: 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34, ауд. 248.

E-mail: pav78@list.ru. Тел. (232)95-37-91, факс (232)95-36-89.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке УО «БелГУТ»

Автореферат разослан «11» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, доцент

А. В. Путято

ВВЕДЕНИЕ

Различные жидкости составляют значительную долю грузов, транспортируемых в цистернах. Резервуары таких цистерн должны обладать достаточной вместимостью и необходимой прочностью, а также обеспечивать сохранность транспортируемых жидких грузов, так как при авариях могут возникнуть ситуации, опасные для жизни и здоровья людей, а также загрязнение окружающей среды.

Создание новых конструкций цистерн сопряжено с анализом динамики систем, включающих твердые тела и жидкость со свободной поверхностью, который представляет собой сложную математическую задачу даже для ньютоновских жидкостей. Автомобильным и железнодорожным транспортом перевозится большое количество различных неньютоновских жидкостей, но до настоящего времени особенности их перетекания в транспортных резервуарах не изучены. Кроме того, несмотря на большое разнообразие известных форм перегородок, демпфирующих колебания жидкостей в резервуарах цистерн, до настоящего времени нет единого мнения о том, какая конфигурация перегородок является оптимальной с точки зрения обеспечения устойчивости и управляемости автомобиля. Разработка подходов по определению рациональной формы и размеров перегородок при одновременном обеспечении требуемой прочности конструкции позволяет обеспечить длительную эксплуатацию цистерн и снизить металлоемкость конструкций транспортных резервуаров, а, следовательно, повысить конкурентоспособность разрабатываемых в настоящее время автомобильных цистерн и контейнеров-цистерн.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Тема диссертационной работы соответствует п. 7.1 «Механика, надежность, безопасность и экологичность машин, трение и износ в машинах, методы расчета, моделирования, конструирования и испытаний машин, агрегатов и узлов» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19.04.2010 г.

Исследования проводились в рамках заданий 2.46 ГКПНИ «Механика» № ГР 20080810, 2008–2010 гг. и 1.15 ГПНИ «Механика, техническая диагностика металлургия» № ГР 20111892, 2011–2012 гг. В 2013 г. осуществлялась работа над научно-исследовательским проектом по гранту Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20130398.

Цель и задачи исследования. Целью работы является установление характера влияния колебаний жидких грузов, имеющих различные плотности и вязкости, на динамику и нагруженность транспортных резервуаров со сплошными и перфорированными перегородками; разработка на основе полученных результатов новой конструкции перегородки, демпфирующей колебания жидкости в цистернах.

Для достижения поставленной цели в работе потребовалось решить следующие задачи:

- осуществить анализ нестационарных режимов движения цистерн и контейнеров-цистерн с целью оценки степени влияния различных параметров на динамику и прочность их конструкций;

- разработать методику компьютерного моделирования колебаний жидкости в транспортном резервуаре при его движении, позволяющую осуществлять расчет диссипации энергии жидкости для моделей с разными геометрическими и физическими параметрами;

- выполнить сравнение результатов расчетов перетекания ньютоновских и неньютоновских жидкостей в частично заполненных транспортных резервуарах при торможении автоцистерн;

- провести расчеты по установлению зависимости диссипации энергии жидкости и напряжений в перфорированной перегородке от размеров отверстий перфорации и на их основе определить рациональные форму и размер выпуклой поперечной перегородки, устанавливаемой в резервуарах цистерн и контейнеров-цистерн.

Объект исследования – автоцистерны и контейнеры-цистерны.

Предметом исследования являются кинематические и динамические параметры цистерн и перетекающих в них жидкостей, а также напряжения в элементах конструкций цистерн.

Положения, выносимые на защиту:

1 Методика оценки влияния геометрических и физических параметров (размеров и формы резервуара; вязкости, плотности, температуры жидкости) на способность перегородок демпфировать колебания цистерн, основанная на интегральном учете распределения удельной диссипации энергии жидкого груза.

2 Зависимости, характеризующие влияние физических свойств жидких грузов на значения гидродинамических давлений и диссипации энергии жидкостей при различных уровнях заполнения транспортного резервуара, которые позволили выработать рекомендации по учету свойств ньютоновских и неньютоновских жидкостей при моделировании торможения цистерн.

3 Методики анализа нестационарных режимов движения цистерн, учитывающие особенности ударного нагружения, позволившие установить уменьшение в 1,6 раза амплитуд вертикальных колебаний автоцистерн с цилиндрическим резервуаром при установке сплошной перегородки при движении по дорогам с различными характеристиками покрытия, а также осуществить ускоренное определение спектра ударного отклика с точностью, достаточной для оценки интенсивности ударного воздействия при испытаниях на прочность контейнеров-цистерн.

4 Зависимости гидродинамических давлений и суммарной диссипации энергии колебаний жидких грузов в цилиндрических резервуарах цистерн с поперечными перегородками от размера и расположения отверстий перфорации, на основании которых с применением генетического алгоритма опре-

делена форма выпуклой поперечной перфорированной перегородки, обеспечивающей максимальное демпфирование колебаний при выполнении условий прочности и жесткости.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Совместно с научным руководителем, д. т. н. Шимановским А. О. осуществлялся выбор направления исследований и анализ полученных результатов. Отдельные результаты автором получены совместно с соавторами научных работ.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационного исследования были доложены и обсуждены на V и VI Белорусских конгрессах по теоретической и прикладной механике (Минск, 2011, 2013), 23-м Международном конгрессе по теоретической и прикладной механике ICTAM 2012 (Пекин, Китай, 2012); 12-м Национальном конгрессе по теоретической и прикладной механике (Варна, Болгария, 2013); на международных конференциях: «Проблемы транспорта и транспортного обеспечения» (Гомель, 2008); «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Гомель, 2008, 2013); «Современные проблемы математики и механики глазами студентов» (Тула, Россия, 2010); «Advanced problems in mechanics» (Санкт-Петербург, Россия, 2011); Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (Герляны, Словакия, 2011); «Научные стремления – 2011» (Минск, 2011); XXIII конференции МИКМУС (Москва, Россия, 2011); «Прочность материалов и элементов конструкций» (Киев, Украина, 2011); «Интерстроймех–2011» (Могилев, 2011); «Энергоэффективность и экологическая безопасность на транспорте, в промышленности и в строительстве» (Гомель, 2011); «European and National Dimension in Research» (Новополоцк, 2012); «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2012); «Инновации в машиностроении» (Минск, 2012); «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2012); «Решетневские чтения» (Красноярск, Россия, 2012); «Machine Modeling and Simulations 2013» (Ошадница, Словакия, 2013); «Строительство и восстановление искусственных сооружений» (Гомель, 2013); «Восьмые Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, Россия, 2013); Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Аяччо, Франция, 2014).

Опубликованность результатов. Основное содержание диссертации опубликовано в 34 научных работах (10,4 а. л.), в том числе 7 статьях (4,1 а. л.) в изданиях, рекомендованных ВАК Республики Беларусь, из которых 4 за рубежом, 2 без соавторства; 17 статьях в научно-технических сборниках и материалах конференций; 8 тезисах докладов на конференциях; 1 патенте на полезную модель; 1 свидетельстве о регистрации компьютерной программы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, содержания, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем диссертации – 146 страниц. Работа содержит 116 рисунков и 8 таблиц на 41 листе. Библиографический список включает 163 наименования и занимает 13 страниц. Приложения размещены на 10 листах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** «Анализ литературных источников. Постановка задач исследования» на основе рассмотрения выполненных ранее различными авторами работ выявлены недостаточно изученные вопросы по теме диссертации.

Практическое применение в резервуарах цистерн нашли различные виды внутренних поперечных и продольных перегородок, которые предназначены для снижения амплитуд колебаний транспортируемых жидкостей. Они изучались в работах М. Д. Безбородько, Е. П. Плавельского, Г. Попова, В. Е. Тройнина, К. С. Biswal, A. Dasgupta, J. J. Van der Walt и др. Однако, многообразие различных технических решений свидетельствует о том, что до сих пор нет единой точки зрения о конструкции, обеспечивающей наилучшее гашение колебаний жидких грузов. А. Е. Линовицким, А. В. Макеевым, R. Modaresi-Tehrani, G. Yan и др. был опубликован ряд статей, демонстрирующих преимущества того или иного конкретного вида перегородок, но не определены пути дальнейшего совершенствования таких устройств.

Традиционно при моделировании движения автомобильных и железнодорожных цистерн, ракетно-космической техники, морских танкеров и др. жидкость рассматривалась в виде эквивалентных механических моделей, которые дают возможность оценить влияние сплошных перегородок на динамику цистерн, однако не позволяют учесть влияние формы перегородок и отверстий в перегородках на затухание колебаний жидкости. Решение некоторых задач о перетекании идеальных и вязких жидкостей в транспортных контейнерах приведено в статьях В. Коморника, А. В. Макеева, F. Chen, S. Mitra, В.-С. Vera и др. Однако, не удалось найти работ, посвященных теоретическому анализу колебаний неньютоновских жидкостей в транспортных резервуарах. Весьма мало исследований, в которых проведен динамический анализ связанных колебаний системы «транспортное средство–жидкий груз».

В работах Шимановского А. О. предложен метод, позволяющий оценить способность перегородок демпфировать колебания жидких грузов, основанный на анализе уменьшения суммарной кинетической энергии жидкости (диссипации энергии) за время одного ее колебания, с помощью которого определена конфигурация перегородки, обеспечивающая лучшее гашение колебаний, но только для одного частного случая. Использование этого метода позволяет осуществить оптимизацию конструкций перегородок путем максимизации диссипации энергии жидкости.

На основе выполненного обзора литературы поставлены задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** «Моделирование динамики цистерн с учетом демпфирования колебаний жидких грузов» выполнено математическое и компьютерное моделирование автотранспортного средства с жидким грузом с целью анализа влияния диссипативных сил на динамику и нагруженность цистерн.

Для оценки влияния перегородок на движение автоцистерны рассмотрена механическая система (рисунок 1), в которой груз представлен эквивалентной моделью в виде материальной точки, масса которой равна массе движущейся части жидкости, связанной с кузовом вязкоупругим элементом, характеристики которого соответствуют свойствам перетекающей жидкости. На основании принципа Даламбера получена система уравнений:

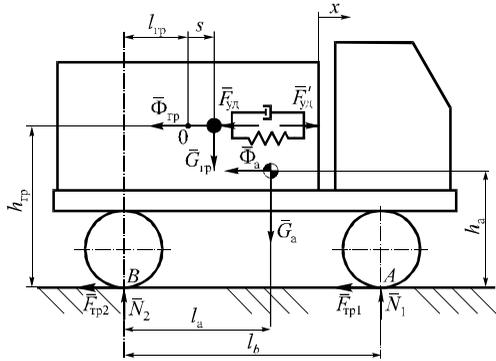


Рисунок 1 – Расчетная схема автомобиля с жидким грузом

$$\begin{cases} m_{гр}(\ddot{s} + \ddot{x}) + F_{уд}(s, \dot{s}) = 0, \\ m_a \ddot{x} - F_{уд}(s, \dot{s}) + F_{тр} = 0, \\ N_2 l_b - m_a g(l_b - l_a) - m_a \ddot{x} h_a - m_{гр}(\ddot{s} + \ddot{x}) h_{гр} - m_{гр} g(l_{гр} + s) = 0, \\ -N_1 l_b + m_a g l_a - m_a \ddot{x} h_a - m_{гр}(\ddot{s} + \ddot{x}) h_{гр} + m_{гр} g(l_b - l_{гр} - s) = 0, \\ F_{тр} = \min \left\{ f N_2, \frac{2M_3}{R_{ш}} \right\} + \min \left\{ f N_1, \frac{2M_{п}}{R_{ш}} \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

где $m_{гр}$, m_a – масса груза и автомобиля соответственно, кг; s – относительное перемещение центра масс груза, м; x – перемещение кузова автоцистерны, м; N_1 , N_2 – нормальные реакции поверхности дороги, Н; l_a , $l_{гр}$ – расстояние от задней оси до центра тяжести автомобиля и груза в положении равновесия соответственно, м; h_a , $h_{гр}$ – высота центра тяжести автомобиля и груза, м; $F_{тр}$ – равнодействующая сил трения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$, возникающих между шинами автомобиля и дорогой, Н; $M_{п}$, M_3 – максимальный тормозной момент на передней и задней осях соответственно, Н·м; f – коэффициент трения между шинами и дорогой; $R_{ш}$ – радиус шины, м; $F_{уд}$ – равнодействующая упругодиссипативных сил взаимодействия жидкости с кузовом, Н:

$$F_{уд} = \alpha \dot{s} + c s^k, \quad (2)$$

α , c , k – некоторые постоянные коэффициенты.

Особенностью системы уравнений (1) является наличие нелинейности, связанной с необходимостью выбора значений сил трения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$ из двух возможных вариантов, первый из которых соответствует движению с проскальзыванием, а второй – без. Поскольку силы трения в общем случае зависят от ускорений автомобиля и груза, то возникает необходимость итерационного решения системы уравнений (1).

В результате численных расчетов для автомобилей на шасси МАЗ установлено, что при значениях показателя степени k от 0,3 до 3 изменение тор-

возможного пути не превышает 1 %. В то же время при малых значениях коэффициента α , соответствующих резервуару без перегородок, наблюдается чередование режимов трения с проскальзыванием и без него (рисунок 2, а), что может стать причиной нарушения управляемости автомобиля и его опрокидывания. Увеличение коэффициента α , которое может быть достигнуто путем установки внутренних перегородок, приводит к плавному изменению сил трения (рисунок 2, б) и, соответственно, к улучшению условий торможения.

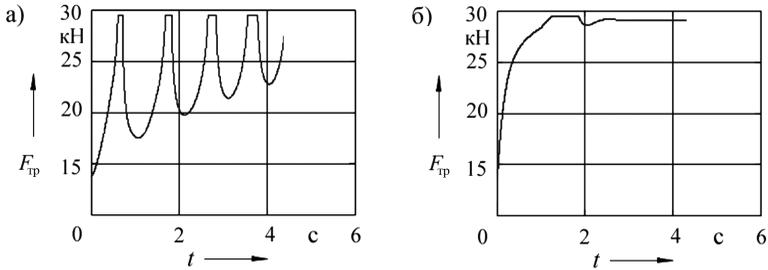


Рисунок 2 – Зависимость силы трения между колесами передней оси и дорогой от времени при коэффициентах а) $\alpha = 2000$ кг/с; б) $\alpha = 20000$ кг/с

Однако рассмотренная модель дает лишь приближенную оценку необходимости установки перегородок. С целью уточненного расчета их демпфирующей способности необходимо использовать модель жидкости как сплошной среды. Для математического описания движения вязкой несжимаемой жидкости применена система дифференциальных уравнений движения, включающая уравнения количества движения и неразрывности:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = F_y + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где u, v, w – проекции вектора скорости частицы жидкости на оси x, y, z соответственно, м/с²; F_x, F_y, F_z – проекции внешних объемных (массовых) сил, Н/кг; ρ – плотность жидкости, кг/м³; p – изотропное напряжение (давление), Па; τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, Па.

Касательные напряжения между частицами различных жидкостей зависят от рода жидкости и скорости перемещения ее слоев. Для ньютоновских:

$$\tau = \mu \frac{d\bar{v}}{d\bar{n}} = \mu \dot{\gamma}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; \bar{v} – вектор полной скорости, м/с; \bar{n} – единичный вектор по направлению, перпендикулярному течению потока жидкости; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹.

Для ряда жидкостей (нефти, растворов и расплавов полимеров, суспензий, красок, меда, патоки и др.) вязкость зависит от скорости сдвига течения. При их моделировании используется степенной закон Оствальда де Вала:

$$\mu = K(\lambda\dot{\gamma})^{n_{ж}-1}, \quad (5)$$

где K – консистентная вязкость жидкости (коэффициент густоты потока), Па·с; λ – временная константа, с; $n_{ж}$ – показатель поведения жидкости.

Течение бингамовских жидкостей (такие вязкопластичные жидкости, как бетонные смеси, буровые растворы, масляные краски и др.) начинается при создании некоторого начального напряжения сдвига, превышающего предел текучести. Связь между скоростью сдвига и напряжением для них имеет вид

$$\tau - \tau_{\gamma} = \mu_{\rho}\dot{\gamma}, \quad \tau > \tau_{\gamma}, \quad (6)$$

где μ_{ρ} – пластическая вязкость неньютоновской жидкости (коэффициент сдвига), Па·с; τ_{γ} – начальное напряжение сдвига, Па.

Компьютерное моделирование с целью решения системы уравнений (3) проводилось в программном комплексе ANSYS. При создании конечноэлементных моделей цистерн внутренний объем резервуара разделялся на две области, одна из которых заполнена транспортируемой жидкостью, а другая – воздухом. В качестве граничных условий при обтекании жидкостью твердых поверхностей использованы условие непроникновения через твердые стенки $v_n = 0$ и прилипания частиц жидкости $v_{\tau} = 0$. Также принималось во внимание наличие свободной поверхности жидкости на границе воздуха и жидкого грунта ($v_n^{ж.гр} = v_n^{возд.}$, $\tau_n^{ж.гр} = \tau_n^{возд.}$).

При анализе турбулентного движения жидкости применялась двухпараметрическая k - ϵ модель турбулентности, которая предполагает решение двух дополнительных уравнений к системе (3), записанной для осредненных скоростей: для вычисления турбулентной кинетической энергии k и нахождения скорости диссипации энергии турбулентности ϵ каждого конечного элемента жидкости.

В программном комплексе ANSYS, который был использован для решения задач гидродинамики, возможно определение только удельных (на единицу массы) значений скорости диссипации энергии жидкости. Поэтому разработана методика расчета суммарной диссипации энергии жидкости в резервуаре за конечный промежуток времени, которая включает следующие этапы: 1) конечноэлементное моделирование перетекания жидкости в транспортном резервуаре в течение некоторого промежутка времени; 2) нахождение скорости диссипации энергии, соответствующей конкретному шагу по времени, как суммы произведений массы каждого конечного элемента на его скорость диссипации энергии; 3) определение нарастающим итогом диссипации энергии за один цикл колебаний как суммы произведений скорости диссипации энергии на время шага.

С целью проверки адекватности методики моделирования реальным процессам выполнены расчеты колебаний цистерны, для которой имеются данные экспериментов, проведенных в университете Конкордия (Канада) K. Modaressi-Tehrani, G. Yan и др., которые продемонстрировали различие равнодействующих продольных и поперечных сил не более, чем на 13,2 %.

Выполнен ряд расчетов, показавших, что значения диссипации энергии воды при нормальных условиях (20°C) для различных уровней заполнения резервуаров без перегородок объемом 2–12 м³ при торможении цистерны с замедлением 0,6 g соответствуют зависимости, приведенной на рисунке 3. При 80 % заполнения диссипация энергии наименьшая, в то же время колебания центра масс жидкости незначительны, поэтому они не оказывают существенного влияния на динамику цистерн.

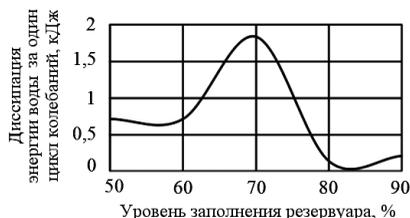


Рисунок 3 – Диссипация энергии воды для разных уровней заполнения цистерны

Если же жидкость заполняет резервуар на 50–60 %, то колебания центра масс жидкости имеют большие амплитуды, а диссипация имеет локальный минимум. Аналогичная ситуация наблюдается и для резервуаров с перегородками. Поэтому принято решение в качестве расчетного использовать уровень заполнения 50–60 % от объема емкости [4].

Результаты расчетов перетекания различных ньютоновских жидкостей, транспортируемых в резервуарах с перегородками и без них, показали, что давление, оказываемое грузом на оболочку резервуара, пропорционально плотности жидкости. Изменение вязкости на значения давлений практически не влияет.

В главе 3 «Моделирование движения ньютоновских и неньютоновских жидкостей в транспортных резервуарах» выполнен анализ влияния реологических свойств жидких грузов на параметры их колебательного движения при торможении цистерн.

С целью анализа влияния размеров конечных элементов на результаты численного решения задач о перетекании жидкости выполнены расчеты торможения цистерны с цилиндрическим резервуаром длиной 4 м и диаметром 2 м при начальной скорости ее движения, равной 15 м/с. Рассмотрены варианты с наличием поперечной перфорированной перегородки (рисунок 4) и без нее, причем число конечных элементов изменялось в диапазоне 40000–450000. Расчеты показали, что значения давлений жидкости на стенки резервуара практически не зависят от размеров сетки. Изменение скорости диссипации и суммарной диссипации при разных размерах сетки конечных элементов в начале торможения (до 0,5 с) составляет 3–10 %, затем разница не превышает 3 % (рисунок 5). Значения суммарной диссипации энергии жидкости за первый цикл ее колебаний, длительность которого составляет около

1,25 с, при увеличении числа конечных элементов с 40000 до 450000 отличаются менее, чем на 4 %.

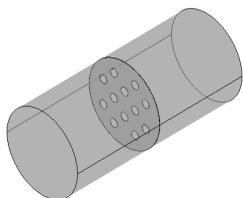


Рисунок 4 – Модель резервуара с перегородкой

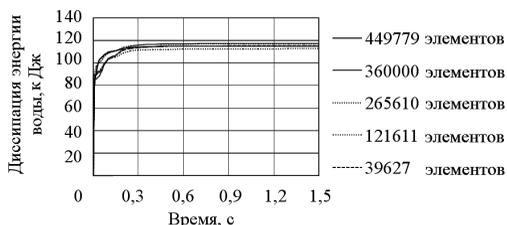
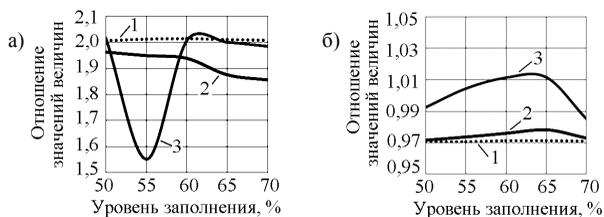


Рисунок 5 – Диссипация энергии воды в резервуаре с перегородкой

Таким образом, при выполнении многократных расчетов колебаний жидких грузов в транспортных резервуарах с перфорированными перегородками объемом от 2 до 12 м³ с целью определения диссипации энергии жидкостей целесообразно использовать сетку конечных элементов с общим их числом от 50000 до 200000 (большее число элементов соответствует меньшим размерам отверстий перегородки).

Выполнено сравнение результатов расчетов динамической нагруженности цистерн и диссипации энергии воды (ньютоновская жидкость), бетонной смеси (бингамовская жидкость) и тяжелой нефти (вязкопластичная жидкость, $n_{ж} = 1,5$) в резервуаре без перегородки и с перфорированными перегородками. Рассмотрен случай движения цистерны с постоянным замедлением 0,6 g и начальной скоростью движения 15 м/с. Принималось, что в начальный момент времени свободная поверхность жидкости была горизонтальной. Сравнение перетекания ньютоновских и неньютоновских жидкостей в транспортных резервуарах с 50–70 % уровнем заполнения с перегородками и без них показало, что максимальные значения гидродинамических давлений наблюдаются в течение 0,2–0,3 с после начала торможения, причем максимальные значения давлений всех рассмотренных жидкостей пропорциональны их плотностям. На рисунке 6 приведены зависимости отношений плотностей жидких грузов (1), а также средних (2) и максимальных (3) значений гидродинамических давлений от уровня заполнения резервуара с перегородкой, имеющей отверстия перфорации диаметром 20 см. Среднее гидродинамическое давление использовалось в качестве интегральной характеристики для сравнения моделей.

Как видно из рисунка 7, а), для жидкости де Вале сохраняется практически такая же зависимость диссипации энергии от времени, как и для ньютоновской жидкости (воды) (рисунок 7, б). Отличие суммарной диссипации к концу первого периода колебаний (20–35 %) имеет место из-за различающихся плотности и кинематической вязкости жидкостей. Для жидкостей с одинаковой плотностью значения суммарной диссипации для случая модели де Вале до 30% меньше и для бингамовской жидкости в 2–2,9 раза больше по сравнению с ньютоновской моделью.



1 – отношение плотностей; 2 – отношение средних давлений; 3 – отношение максимальных давлений
Рисунок 6 – Отношение значений величин для а) бетонной смеси и воды; б) нефти и воды через $t = 0,1$ с после начала торможения

Выполненный анализ показал, что результаты расчетов перетекания ньютоновских жидкостей могут быть применены к неньютоновским. При этом значения максимальных гидродинамических давлений в резервуаре, которые возникают сразу после начала торможения, для разных жидкостей относятся так же, как и плотности. Значения суммарной диссипации энергии, например, бетонной смеси в 5 и более раз больше значений для воды, тогда как для тяжелой нефти они составляют около 70 % от воды [6].

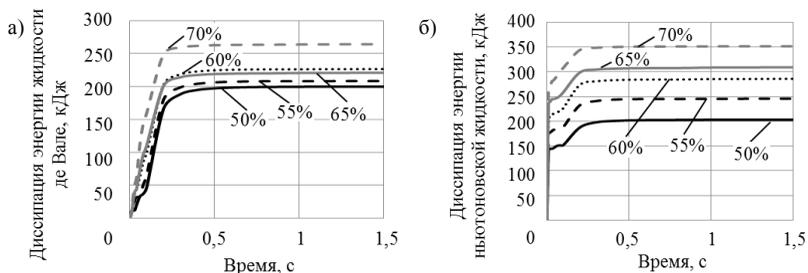


Рисунок 7 – Диссипация энергии жидкостей для разных уровней заполнения резервуара: а) модель де Вале (тяжелая нефть), б) ньютоновская (вода)

В четвертой главе «Анализ нестационарных режимов движения цистерн» выполнены расчеты колебаний и нагруженности автоцистерн с учетом ударов жидкости о потолок резервуара при движении по дорогам с разного типа неровностями, а также контейнеров-цистерн при соударении вагонов.

Моделирование движения цистерны с жидким грузом, массово-геометрические характеристики шасси которой соответствуют автомобилю МАЗ-437041, по дороге с одиночными и периодическими неровностями проводилось в среде пакета MCS.ADAMS. Компьютерная модель (рисунок 8) включала твёрдые тела, соединённые между собой жесткими либо упруго-диссипативными связями. Для моделирования колебаний жидкости в цистернах

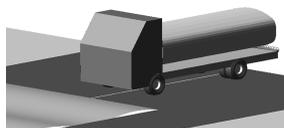


Рисунок 8 – Компьютерная модель автоцистерны в MSC.ADAMS

использована дискретно-массовая эквивалентная модель.

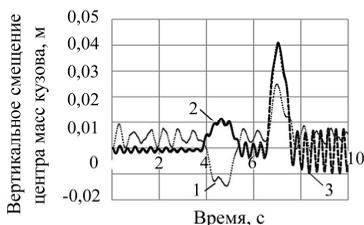
Коэффициент жесткости эквивалентной упругой связи определялся по зависимости, предложенной А. О. Шимановским на основе аппроксимации решений гидродинамической задачи, которая получила экспериментальное подтверждение в работах С. Ю. Гриднева и А. Н. Будковского:

$$\begin{cases} c = c_n = 8m_{\text{ж}} \frac{g \operatorname{th}^2(\pi h / l)}{\pi^2 h} & \text{при } s \leq s_0, \\ c = c_n e^{\frac{s-s_0}{3(s_{\text{max}}-s)}} & \text{при } s > s_0, \end{cases} \quad (7)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса транспортируемой жидкости, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; s_0 – значение координаты s , при котором жидкость ударяется о потолок, м; s_{max} – максимальная величина, на которую может сместиться центр тяжести колеблющейся жидкости от равновесного положения, м; l – ширина основания резервуара, м; h – высота уровня жидкости, м.

Расчеты движения цистерны по дороге с единичной неровностью показали, что при скоростях движения 7, 9, 14–15 м/с амплитуды колебаний центра тяжести резервуара с твердым грузом значительно превышают значения, полученные для жидкого груза. В то же время, при скоростях 8, 11–13 м/с колебания жидкости в резервуаре автоцистерны вызывают еще большие смещения его центра масс. Полученные результаты объясняются изменением частот собственных колебаний цистерны с жидкостью по сравнению с автомобилем, перевозящим твердый груз. При установке сплошной перегородки, разделяющей резервуар на два равных отсека, максимальные смещения по вертикали уменьшаются более, чем в 1,5 раза (рисунок 9) [7].

Результаты моделирования переезда через искусственную неровность высотой 10 и 20 см показали, что амплитуды колебаний центра масс жидкости не



1 – со сплошной поперечной перегородкой;

2 – с твердым грузом; 3 – с жидким грузом
Рисунок 9 – Вертикальное смещение центра масс кузова при переезде через неровность высотой 10 см с наездом на нее колес с одной стороны

превышают 0,3 м, причем для резервуара без перегородки она оказывается меньшей по сравнению с разделенной на два отсека цистерной, что объясняется большей массой колеблющейся жидкости и малыми скоростями движения. Анализ расчетов движения автоцистерны со сплошной перегородкой и без по участку грунтовой дороги протяженностью 20 м с постоянно чередующимися выпуклостями и впадинами высотой 5 см, показал, что наряду с постоянной вибрацией имеет место уменьшение амплитуды колебаний.

Поскольку контейнеры-цистерны транспортируются как автомобильным,

так и железнодорожным транспортом, то их испытывают на удар в продольном направлении в соответствии с руководством ООН «Рекомендации по перевозке опасных грузов». По результатам испытаний анализируется спектр ударного отклика (СУО). Оценка достаточности силы удара базируется на решении уравнения перемещения Z системы с одной степенью свободы относительно испытательной платформы, которое с применением интегралов Дюамеля, ведет к уравнениям для расчета относительных перемещений и ускорений вида:

$$Z_i = -\frac{\Delta t}{\omega_d} \sum_{j=0}^i \ddot{y}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-j)} \sin [\omega_d \Delta t (i-j)], \quad (8)$$

$$\ddot{Z}_i = 2\zeta \omega_n \Delta t \sum_{j=0}^i \ddot{y}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-j)} \cos [\omega_d \Delta t (i-j)] + \omega_n^2 (2\zeta^2 - 1) Z_i, \quad (9)$$

где Δt – временной интервал между значениями ускорения, с; i – число измеренных значений ускорений; $\ddot{y}(t)$ – входные значения ускорений испытательной платформы, м/с²; ζ – декремент колебаний; ω_n – собственная частота без учета затухания, рад/с; ω_d – собственная частота при учете сопротивлений, рад/с;

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (10)$$

Разработана программа в среде Visual Basic, позволяющая выполнить два вида расчета амплитудно-частотных характеристик: экспресс-решение и детализированное [34]. Экспресс-решение позволяет получить СУО на основе частичной выборки значений ускорений, что дает возможность уменьшить время расчета до нескольких минут и сделать предварительный вывод о том, насколько экспериментальные данные удовлетворяют нормативным требованиям: превышает ли кривая СУО минимальную кривую $a_g = 1,95 \omega^{0,355}$ на всех частотах в диапазоне от 3 до 100 Гц. Применение разработанной программы позволяет оперативно обрабатывать данные, полученные в ходе испытаний на удар, и при необходимости принимать решение о проведении дополнительных испытаний либо об усилении конструкции контейнера-цистерны, в том числе, путем установки перегородок.

В **пятой главе** «Определение рациональной формы перфорированной перегородки в цилиндрическом резервуаре цистерны» транспортного средства разработана конструкция перегородки, которая наряду с максимальным демпфированием колебаний жидкостей позволяет обеспечить требуемую прочность и жесткость конструкции.

В качестве объекта исследования выбрана автоцистерна длиной 4 м и диаметром 2 м. Результаты динамического анализа модели транспортного резервуара со сплошной перегородкой (110350 конечных элементов) показали, что максимальные давления при торможении возникают в месте соединения перегородки с нижней частью оболочки, что соответствует имеющимся на практике случаям повреждения перегородок и оболочки резервуара.

Выполнены расчеты с целью анализа нагруженности конструкций транспортных резервуаров, имеющих перегородку с отверстиями. Проведенный анализ показал, что при диаметрах отверстий перфорации до 5 см, поведение жидкости в цистернах с перфорированной и сплошной перегородкой практически не отличается. При диаметрах более 5 см происходит увеличение скорости диссипации энергии жидкости, в результате чего гашение ее колебаний происходит быстрее, чем при перегородке, разделяющей резервуар цистерны на два отдельных отсека. Наличие перфорации в перегородке меняет схему распределения давлений в резервуаре, а их значения при размере отверстий перфорации 5 см уменьшаются на 25 % по сравнению со сплошной перегородкой (рисунок 10).

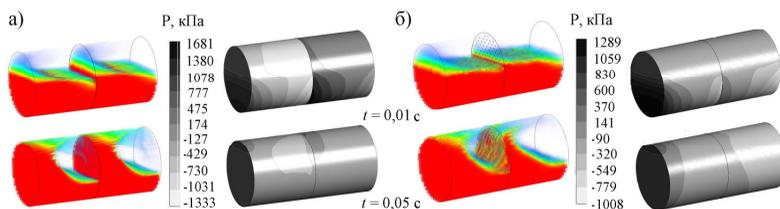


Рисунок 10 – Положение жидкости и распределение относительных давлений в резервуаре а) со сплошной перегородкой; б) с перфорированной

Анализ перетекания жидкостей в резервуарах с перфорированными перегородками для отверстий диаметром 5–30 см показал, что в начале торможения наибольшие гидродинамические давления возникают в месте соединения боковой стенки и торца цистерны, а также в нижней части перегородки со стороны натекания на нее жидкого груза, причем торец резервуара, расположенный по ходу цистерны, испытывает давления до 40% большие (в зависимости от размера отверстий), чем перегородка.

Установка перфорированных перегородок ведет к существенному снижению максимальных давлений внутри резервуара: при диаметре отверстий 20 см они снижаются в 4,5 раза по сравнению со сплошными перегородками (рисунок 11, а). Суммарная диссипация энергии жидкого груза максимальна при размере отверстий перфорации 18–22 см (рисунок 11, б), если площадь отверстий составляет 30–40 % площади перегородки.

Помимо максимизации диссипации энергии перегородка должна удовлетворять условиям прочности, поэтому ее глубина не должна быть меньше 100 мм (рисунок 12, а). Кроме того, для удобства изготовления (с технологической точки зрения) целесообразно, чтобы перегородка имела форму тела вращения и толщину, одинаковую с оболочкой резервуара. Поставлена задача по определению координат x_k ($k = 1 \dots 8$) точек 1–8, таких что $y_{k-1} - y_k = \text{const}$, при которых, с одной стороны максимальна диссипация энергии жидкости, с другой – выполняются условия прочности. В качестве метода решения задачи использован генетический алгоритм в его канонической форме, предложенной Дж. Холландом. Для решения оптимизационной задачи сначала был создан исходный массив

генов, состоящий из координат точек перегородки, выбранных из всей области допустимых значений ($0 \leq x_k \leq 100$ мм). С целью определения координат с точностью до 1 мм в пределах рассматриваемого интервала для каждой точки рассматривались $2^7 = 128$ возможных положений, взятых с постоянным шагом. Точки 0...9 соединялись плавной кривой с применением кубических сплайнов, после чего оболочка образовывалась путем вращения кривой вокруг оси Ox . Затем выполнялся расчет напряженно-деформированного состояния получившейся конструкции под действием гидродинамических нагрузок, в качестве которых использовано максимальное значение давления, равномерно распределенного по площади перегородки с диаметром отверстий 20 см.

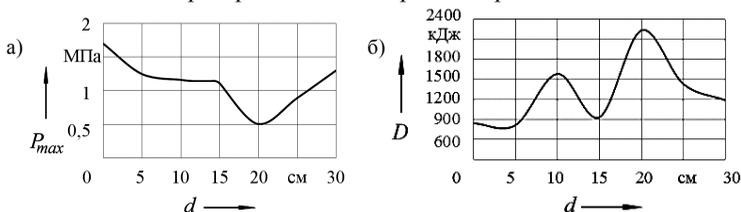


Рисунок 11 – Зависимость от размера перфорации а) максимальных давлений в резервуаре; б) суммарной диссипации энергии жидкого груза

Зависимость максимального напряжения в конструкции от положений точек x_k рассматривалась в качестве целевой функции, подлежащей минимизации. Отбирались гены, лучшим образом удовлетворяющие целевой функции. Таким образом, ограничившись 30 итерациями при числе возможных вариантов решений 2^{56} , удалось получить требуемую форму перегородки (рисунок 12, б).

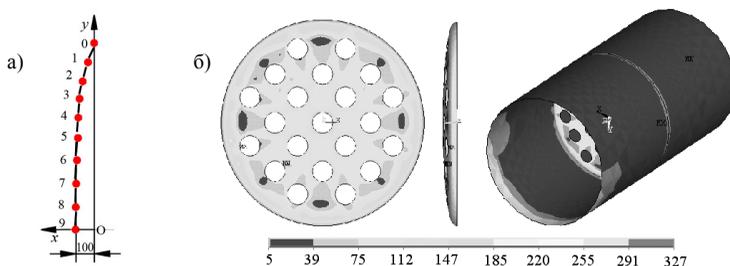


Рисунок 12 – Перегородка выпуклой формы с отверстиями диаметра 20 см а) контрольные точки; б) напряжения (МПа) в перегородке и боковых стенках оболочки

Особенностью найденной формы является достаточно большой радиус кривизны перегородки в центральной части и значительно меньший в области соединения с оболочкой резервуара [33]. Полученные значения эквивалентных напряжений нигде не превышают предел текучести конструкционной стали, что свидетельствует о выполнении требований по прочности конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационного исследования

1 На основе математического моделирования торможения частично заполненной цистерны установлено, что при отсутствии перегородок вследствие относительного смещения жидкости наблюдается чередование режимов трения шин о дорогу с проскальзыванием и без него, что ведет к нарушению управляемости автомобиля. Установка перегородок, демпфирующих колебания жидкого груза, приводит к плавному изменению сил трения и, соответственно, к улучшению условий торможения. Разработана методика оценки влияния геометрических и физических параметров (размеров и формы резервуара; вязкости, плотности и температуры жидкости) на способность перегородок демпфировать колебания цистерн, основанная на интегральном учете распределения удельной диссипации энергии жидкого груза [2, 5].

2 В результате анализа перетекания ньютоновских жидкостей в транспортном резервуаре при торможении цистерны выявлено, что при увеличении числа конечных элементов модели перетекания жидкости в резервуаре с перфорированными перегородками с 40000 до 450000 значения суммарной диссипации энергии жидкости за первый цикл ее колебаний изменяются менее, чем на 4 %. Это позволило рекомендовать при расчетах колебаний жидких грузов в транспортных резервуарах объемом от 2 до 12 м³ с перфорированными перегородками с целью определения диссипации энергии жидкостей использовать сетку конечных элементов с общим их числом 50000–250000 (большее число элементов соответствует меньшим размерам отверстий перегородки). Установлено, что самый неблагоприятный уровень заполнения резервуара с точки зрения сложности гашения колебаний транспортируемой жидкости составляет 50–60 %. Расчеты перетекания ньютоновских жидкостей, транспортируемых в резервуарах с перегородками и без них показали, что давление, оказываемое грузом на оболочку резервуара пропорционально плотности жидкости. Изменение вязкости на значения давлений практически не влияет [4–6].

Сравнение перетекания в транспортных резервуарах жидкостей с различными реологическими свойствами показало, что результаты расчетов перетекания ньютоновских жидкостей могут быть применены к неньютоновским. При этом значения максимальных гидродинамических давлений в резервуаре, которые возникают в первые 0,2–0,3 с после начала торможения, для разных жидкостей относятся так же, как их плотности. Значения суммарной диссипации энергии бингамовской жидкости в 2–2,9 раза больше ньютоновской, тогда как для жидкостей де Вале они составляют 70–95 % от ньютоновской [6].

3 На основе разработанных методик анализа нестационарных режимов движения цистерн и контейнеров-цистерн, принимающих во внимание соударение жидкости с оболочкой резервуара, установлено, что при скоростях движения от 7 до 15 м/с колебания жидкого груза в цистерне с цилиндриче-

ским резервуаром без перегородок могут приводить как к увеличению амплитуд вертикальных колебаний кузова, так и их снижению по сравнению с автомобилем с твердым грузом. Установка сплошной перегородки позволяет уменьшить амплитуды вертикальных колебаний кузова цистерны до 1,6 раз. Разработанная методика ускоренного определения спектра ударного отклика на основе частичной выборки значений ускорений легла в основу создания компьютерной программы для обработки результатов испытаний на прочность контейнеров-цистерн, позволяющая оценивать результаты испытаний в режиме реального времени и оперативно принимать решения о необходимости дополнительных соударений вагонов либо об усилении конструкции контейнера-цистерны, в том числе, путем установки перегородок [1, 7, 34].

4 Выполненный анализ торможения транспортного средства с жидким грузом при наличии в резервуаре перфорированной перегородки показал, что при диаметрах отверстий от 5 до 30 см максимум диссипации энергии жидкости имеет место при диаметре отверстий 18–22 см. Введение перфорации позволяет снизить максимальные гидродинамические давления до 4,5 раз при диаметре 20 см по сравнению со сплошной перегородкой. На основе использования генетического алгоритма получена оптимальная форма перфорированной перегородки в цилиндрическом резервуаре, имеющей форму тела вращения, при использовании которой наряду с обеспечением максимальной диссипации энергии жидкости достигается минимизация напряжений. Предлагаемое техническое решение [33] дает возможность снижения напряжений в перегородке и в оболочке резервуара, что позволяет повысить долговечность конструкции [2–4, 6].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные методики подбора устройств, демпфирующих колебания жидкостей в транспортных резервуарах, могут быть использованы при создании новых конструкций цистерн, обладающих наряду с улучшенными динамическими свойствами высокой долговечностью. Преимущества, позволяющие повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции, были оценены в ОАО «Гродненский механический завод» и приняты к применению в проектируемых конструкциях цистерн.

Предложенное техническое решение [33] может быть использовано в новых конструкциях цистерн и контейнеров-цистерн.

Разработанная методика ускоренного анализа ударных процессов и созданная на ее основе компьютерная программа [34] принята к использованию в Испытательном центре железнодорожного транспорта «СЕКО».

Результаты исследования также используются в учебном процессе УО «БелГУТ» и ГИИ МЧС при подготовке инженеров механиков и специалистов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Документы, подтверждающие использование результатов работы, приведены в приложениях к диссертационной работе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1 Shimanovsky, A. O. Computer modeling of wheeled vehicles fastened to railway platform / A. O. Shimanovsky, M. G. Kuzniatsova // *Revista Academiei Fortelor Terestre*. – 2011. – Vol. 16. – № 1 (61). – P. 130–136.

2 Обеспечение безопасности движения автоцистерн на основе оптимизации конструкции кузова / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2012. – № 3. – С. 65–71.

3 Shimanovsky, A. O. The Strength Analysis of the Partitions in Road Tanker Reservoirs / A. O. Shimanovsky, M. G. Kuzniatsova, Yu. M. Pleskachevskii // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 48. – P. 607–612.

4 Кузнецова, М. Г. Демпфирование колебаний жидкостей в транспортных резервуарах с перегородками / М. Г. Кузнецова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2013. – № 2 (38). – С. 24–28.

5 Kuzniatsova, M. 3D modeling of liquid oscillations in reservoirs with perforated baffles / M. Kuzniatsova // *Technolog*. – 2013. – Vol. 5. – № 4. – P. 103–106.

6 Шимановский, А. О. Гидродинамическая нагруженность перегородок цистерн при транспортировке жидкостей с различными реологическими свойствами / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2013. – № 4. – С. 18–21.

7 Шимановский А. О. Компьютерное моделирование движения автоцистерн по дорогам с неровностями разных типов / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // *Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов*. – Минск: ОАО «Промпечать», 2013. – Вып. 2. – С. 255–260.

Статьи в сборниках научных работ

8 Шимановский, А. О. Применение генетического алгоритма для анализа торможения цистерны / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр.* – Гомель: БелГУТ, 2008. – Вып. 2. – С. 48–52.

9 Шимановский, А. О. Анализ методов минимизации влияния колебаний транспортируемых жидкостей на динамику автоцистерн / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова, А. В. Коваленко // *Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов*. – Минск: ОАО «Промпечать», 2012. – Вып. 1. – С. 122–125.

10 Кузнецова, М. Г. Моделирование колебаний жидких грузов в резервуарах с различными перегородками / М. Г. Кузнецова // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр.* – Гомель: БелГУТ, 2012. – Вып. 6. – С. 93–97.

11 Кузнецова, М. Г. Анализ спектра ударного отклика при испытаниях контейнеров на удар / М. Г. Кузнецова, А. О. Шимановский // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр.* – Гомель: БелГУТ, 2013. – Вып. 7. – С. 53–59.

Материалы конференций

12 Кузнецова, М. Г. Применение генетического алгоритма при моделировании динамики цистерн / М. Г. Кузнецова // *Современные проблемы математики и механики глазами студентов: тезисы и доклады студентов на международной конференции.* – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Вып. 5. – С. 98–102.

13 Шимановский, А. О. Динамическая устойчивость сельскохозяйственной машины с навесной емкостью для жидкости / А. О. Шимановский, М. А. Бойкачев, М. Г. Кузнецова // *Прочность материалов и элементов конструкций: Труды международной научно-технической конференции.* – Киев: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 126–132.

14 Shimanovsky, A. O. Computer Modeling of Liquid Sloshing in Road Tanker Reservoirs / A. O. Shimanovsky, Yu. M. Pleskachevskii, M. G. Kuznetsova // *Proceedings of the XXXIX Summer School-Conference “Advanced problems in mechanics” St. Petersburg (Repino) July 1–5, 2011.* – St. Petersburg: Russian Academy of Sciences Institute for Problems in Mechanical Engineering, 2011. – P. 412–417.

15 Shimanovsky, A. O. The Influence of Transported Liquid Viscosity on its Sloshing in Tanker Reservoirs / A. O. Shimanovsky, M. G. Kuzniatsova // *Modeling of Mechanical and Mechatronic Systems 2011: The 4-th International Conference, September 20-22, Herlany, Slovak Republic.* – Herlany, 2011. – P. 446–451.

16 Шимановский, А. О. Моделирование колебаний жидкостей в резервуарах строительных и дорожных машин / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // *Интерстроймех – 2011: материалы междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 247–250.

17 Шимановский, А. О. Влияние физических свойств жидкостей на их перетекание в транспортном резервуаре при торможении цистерны / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова, М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский // *Механика – 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.].* – Минск, 2011. – Т. I. – С. 183–188.

18 Кузнецова, М. Г. Колебания жидких грузов в резервуарах автоцистерн / М. Г. Кузнецова // *Сборник материалов II Международной научно-практической молодежной конференции «Научные стремления – 2011» (14–18 ноября 2011 года): Т. 1* – Минск: Издательство «Белорусская наука», 2011. – С. 575–578.

19 Шимановский, А. О. Обеспечение безопасности транспортировки

жидких грузов автоцистернами / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Энергоэффективность и экологическая безопасность на транспорте, в промышленности и в строительстве: материалы Междунар. научн.-практич. конф. / под общ. ред. А. Б. Невзоровой; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2011. – С. 97–100.

20 Shimanovsky, A. O. Influence of liquid sloshing on road tanker dynamics and loading / Yu. M. Pleskachevskii, A. O. Shimanovsky, A. U. Putsiata, M. G. Kuzniatsova // Proceedings of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics [Computer file]: August 19-24, Beijing, China. – Beijing, 2012. – 2 p. – 1 DVD-ROM.

21 Kuznetsova, M. G. Various Liquid Pressures Exerted on Road Tank Reservoirs while Transporting / M. G. Kuzniatsova, A. O. Shimanovsky // European and national dimension in research: Materials of the 4th Junior Researchers Conference, Novopolotsk, April 25–26, 2012, Belarus. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – Т. III – С. 101–105.

22 Шимановский, А. О. Колебания жидкостей в резервуарах цистерн с перегородками при переходных режимах движения / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Материалы докладов Международной конференции «Восьмые Окуневские чтения». 25–28 июня 2013 г., г. Санкт-Петербург. – Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2013. – С. 200–202.

23 Кузнецова, М. Г. Транспортировка жидких грузов при проведении строительных работ / М. Г. Кузнецова // Строительство и восстановление искусственных сооружений: материалы междунар. науч.-техн. конф. Часть 1. – Гомель: БелГУТ, 2013. – С. 290–294.

24 Putsiata, A. V. Modeling of Railway Tanks Stress-Strain Condition under Hydrodynamic Loading / A. V. Putsiata, A. O. Shimanovsky, M. G. Kuzniatsova // Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, J. Pombo, (Editor), Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland [Computer file]: April 8–11, Ajaccio, Corsica, France. – Ajaccio, 2014. – 13 p. – 1 DVD-ROM.

Тезисы докладов

25 Шимановский, А. О. Моделирование динамики транспортного средства с навесной емкостью для жидкости / А. О. Шимановский, М. А. Бойкачев, М. Г. Кузнецова // Проблемы и перспективы развития транспортных систем строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь. – Гомель: БелГУТ, 2008. – С. 189–190.

26 Шимановский, А. О. Анализ нестационарных режимов движения цистерн / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Сборник научных работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС 2008». – Минск: Изд. центр БГУ, 2009. – С. 147–148.

27 Кузнецова, М. Г. Анализ динамики жидких грузов в резервуарах автоцистерн с перфорированными перегородками. XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2011): материалы конференции (Москва, 14-17 декабря 2011 г.). / М: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. – С. 230.

28 Кузнецова, М. Г. Демпфирование колебаний жидкости в транспортных резервуарах с перегородками / М. Г. Кузнецова // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. IX Междунар. науч.-техн. конф. (научные чтения, посвященные П. О. Сухому), Гомель, 25–26 окт. 2012 г. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – С. 23–24.

29 Шимановский, А. О. Влияние формы перегородок на колебания жидкости в резервуарах автоцистерн / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VI Международ. науч.-практ. конф./ М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2012. – С. 118–119.

30 Шимановский, А. О. Демпфирование колебаний жидкости в резервуарах с перегородками / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Решетневские чтения: материалы XVI Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (7–9 ноября 2012 г., Красноярск). – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2012. – Ч. 1. – С. 287–288.

31 Шимановский, А. О. Автоматизация обработки экспериментальных данных при испытаниях контейнеров-цистерн на ударное воздействие / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Проблемы и перспективы разв. трансп. систем и строит. комплекса : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь. – Гомель : БелГУТ, 2013. – С. 55–56.

32 Kuzniatsova, M. Design Optimization of Perforated Baffles Installed in the Road Tanker Reservoir / M. Kuzniatsova, A. Shimanovsky // Book of Abstracts of the 12th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 23-26 September 2013, Varna, Bulgaria. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2013. – P. 24.

Объекты интеллектуальной собственности

33 Перегородка резервуара автоцистерны: пат. 9993 Респ. Беларусь: МПК В 60Р 3/22 / М. Г. Кузнецова, А. О. Шимановский; заявитель Бел. гос. ун-т тр-та. – № u20130655 ; заявл. 05.08.2013; опубл. 28.02.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 169.

34 Анализ СУО: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 657 Респ. Беларусь / М. Г. Кузнецова, А. О. Шимановский; правообладатель Бел. гос. ун-т тр-та. – № С20140016; заявл. 13.02.2014; зарегистрировано 18.04.2014.

РЭЗІЮМЭ

Кузняцова Марына Рыгораўна

ДЫНАМІКА ЦЫСТЭРНАЎ З СУЦЭЛЬНЫМІ І ПЕРФАРАВАНЫМІ ПЕРАГАРОДКАМІ ПРЫ ТРАНСПАРТАВАННІ ВАДКАСЦЯЎ

Ключавыя словы: цыстэрна, канчатковаэлементнае мадэляванне, перагародка, дэмпфаванне ваганняў, гідрадынамічны ціск.

Мэта работы: усталяванне характару ўплыву ваганняў вадкіх грузаў, якія маюць розныя шчыльнасці і глейкасці, на дынаміку і нагружанасць транспартных рэзервуараў з суцэльнымі і перфараванымі перагародкамі; распрацоўка на аснове атрыманых вынікаў новай канструкцыі перагародкі, што дэмпфуе ваганні вадкасці ў цыстэрнах.

Метады даследавання і апаратура: аналітычныя метады дынамікі сістэм цвёрдых целаў, вылічальныя эксперыменты на падставе канчатковаэлементнага кампутарнага мадэлявання руху транспартных рэзервуараў з вадкасцю.

Атрыманая вынікі і іх навізна. Распрацаваны метадыкі аналізу нестацыянарных рэжымаў руху цыстэрнаў, якія ўлічваюць асаблівасці гідрадынамічнага нагружэння аўтацыстэрнаў і кантэйнераў-цыстэрнаў. Выпрацаваны рэкамендацыі па ўліку ўласцівасцяў неньютанаўскіх вадкасцяў падчас транспартавання пры канчатковаэлементным мадэляванні тармажэння цыстэрнаў. Усталяваны залежнасці сумарнай дысіпацыі энергіі ваганняў вадкіх грузаў і гідрадынамічных ціскаў у цыліндрычных рэзервуарах цыстэрнаў з перагародкамі ад памеру і размяшчэння адтулін перфарцыі, на падставе якіх вызначана форма выпуклай папярочнай перагародкі, якая забяспечвае максімальнае дэмпфаванне ваганняў пры выкананні ўмоў трываласці і калянасці.

Ступень выкарыстання і рэкамендацыі. Вынікі працы, у тым ліку абароненыя патэнтам на карысную мадэль і пасведчаннем аб рэгістрацыі кампутарнай праграмы, выкарыстаны пры праектаванні новых канструкцый цыстэрнаў і кантэйнераў-цыстэрнаў. Яны знайшлі ўжыванне на ААТ "Гродзенскі механічны завод", Выпрабавальным цэнтры чыгуначнага транспарта "СЕКО" і ў навучальным працэсе ўстаноў вышэйшай адукацыі.

Сфера ўжывання: машынабудаванне, аўтамабільны і чыгуначны транспарт.

РЕЗЮМЕ

Кузнецова Марина Григорьевна

ДИНАМИКА ЦИСТЕРН СО СПЛОШНЫМИ И ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЖИДКОСТЕЙ

Ключевые слова: цистерна, конечноэлементное моделирование, перегородка, демпфирование колебаний, гидродинамическое давление.

Цель работы: установление характера влияния колебаний жидких грузов, имеющих различные плотности и вязкости, на динамику и нагруженность транспортных резервуаров со сплошными и перфорированными перегородками; разработка на основе полученных результатов новой конструкции перегородки, демпфирующей колебания жидкости в цистернах.

Методы исследования и аппаратура: аналитические методы динамики систем твердых тел, вычислительные эксперименты на основе конечноэлементного компьютерного моделирования движения транспортных резервуаров с жидкостью.

Полученные результаты и их новизна. Разработаны методики анализа нестационарных режимов движения цистерн, учитывающие особенности гидродинамического нагружения автоцистерн и контейнеров-цистерн. Выработаны рекомендации по учету неньютоновских свойств транспортируемых жидкостей при конечноэлементном моделировании торможения цистерн. Установлены зависимости суммарной диссипации энергии колебаний жидких грузов и гидродинамических давлений в цилиндрических резервуарах цистерн с перегородками от размера и расположения отверстий перфорации, на основании которых определена форма выпуклой поперечной перегородки, обеспечивающей максимальное демпфирование колебаний при выполнении условий прочности и жесткости.

Степень использования и рекомендации. Результаты работы, в том числе защищенные патентом на полезную модель и свидетельством о регистрации компьютерной программы, могут быть использованы при проектировании новых конструкций цистерн и контейнеров-цистерн. Они нашли применение на ОАО «Гродненский механический завод», Испытательном центре железнодорожного транспорта «СЕКО», в учебном процессе вузов.

Область применения: машиностроение, автомобильный и железнодорожный транспорт.

SUMMARY

Kuznetsova Marina Grigor'evna

DYNAMICS OF TANKS WITH SOLID AND PERFORATED BAFFLES AT LIQUID TRANSPORTING

Keywords: tank, finite element modeling, baffle, damping of oscillations, hydrodynamic pressure.

Purpose of the work: the establishment of the influence of liquid cargo with different density and viscosity sloshing on the dynamics and loading of road tanks with solid and perforated baffles; the development of the new design for the damping oscillations baffle based on the obtained results.

Research methods and equipment: analytical methods of solid bodies system dynamics, computational experiments based on the finite element computer modeling of movement of transport reservoirs with liquid cargo.

The obtained results and their originality. There were developed the methods of tanks non-stationary movement modes analysis, which consider the peculiarities of the road tankers and tank-containers hydrodynamic loading. The recommendations for the liquid cargo non-Newtonian properties considering at finite element modeling of tanks braking are worked out. The dependences of total liquid cargo energy dissipation and hydrodynamic pressures in cylindrical tanks with baffles on the size and location of the perforation were obtained. On the basis of these dependences there was developed the shape of the convex transverse partition which provides both maximum liquid oscillations damping and the conditions of strength and stiffness fulfillment.

Extent of use and recommendations. Results of work, including patent-protected utility model and a certificate of computer program registration can be used for tanks and tank-containers new designs. They were applied at OJS "Grodno Mechanical Plant", Test Center of Railway Transport "SECO" and at educational process of higher education institutions.

Field of application: engineering, automobile and rail transport .

Научное издание

КУЗНЕЦОВА Марина Григорьевна

**Динамика цистерн со сплошными и перфорированными
перегородками при транспортировке жидкостей**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 10.11.2014 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 1,40. Тираж 100 экз. Зак. № 3110.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель