

561

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

БИЛИЧЕНКО Юрий Николаевич

629.463

УДК 625.245.6:534.141.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОТЛОВ ЖЕЛЕЗНО-
ДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ПРИ УДАРАХ В АВТОСЦЕПКУ.

Об. 22.07 - Подвижной состав железных дорог и
тяга поездов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Днепропетровск 1990

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Институте технической механики
Академии наук Украинской ССР.

- Научный руководитель - заслуженный работник высшей школы,
доктор технических наук, профессор
Е.П.БЛОХИН
- Научный консультант - кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Г.И.БОГОМАЗ
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Ю.П.БОРСЕНКО
- кандидат технических наук, доцент
И.Г.БАРБАС
- Ведущее предприятие - Производственное объединение
"Азовмаш" (г. Мариуполь)

Защита состоится 29 июня 1990 года
в _____ час _____ мин. на заседании Специализированного
совета К114.07.01 в Днепропетровском ордена Трудового Красного
Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени

Ака-

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В соответствии с решениями партии и правительства по ускоренному развитию и коренной перестройке народного хозяйства страны на период до 2000 года намечен широкий комплекс мер по техническому перевооружению различных отраслей, в том числе железнодорожного транспорта. Одним из путей решения этой задачи, обуславливающей повышение провозной и пропускной способности железнодорожных магистралей, является создание более грузных специализированных вагонов с улучшенными технико-экономическими характеристиками, высокой степенью эксплуатационной надежности и повышенной металлоемкостью.

Увеличение объема перевозок наливных грузов и существенное ужесточение условий эксплуатации транспортных средств предъявляет повышенные требования к динамическим и прочностным качествам существующих и вновь создаваемых конструкций цистерн. В этих условиях актуальной является задача дальнейшего развития и совершенствования способов определения гидродинамической нагруженности элементов конструкций цистерн под воздействием ударных нагрузок, возникающих при маневровых операциях и неустановившихся режимах движения подвижного состава, поскольку при этом нагруженность отдельных несущих элементов может достигать значений, которые превышают нормативно допускаемые. Необходимость решения такой задачи возникает на стадии технического проектирования и при отработке опытных образцов конструкций цистерн и вызвана тем, что на нагруженность цистерн существенное влияние при указанных режимах движения оказывает воздействие транспортируемого подвижного жидкого груза. Наличие свободной поверхности жидкости приводит при ударах в автосцепку к появлению значительных нагрузок на котел цистерны и, соответственно, на узлы его крепления и другие несущие элементы конструкции. Определение особенностей распределения гидродинамического воздействия жидкого груза на котлы железнодорожных цистерн при указанных ударных нагрузках требует проведения специальных исследований.

Цель работы состоит в исследовании с помощью динамически-подобных физических моделей гидродинамических процессов, протекающих в котлах железнодорожных цистерн при ударах в автосцепку, и разработке практических рекомендаций по определению нагруженности котлов цистерн транспортируемым жидким грузом. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

5463a

определение условий, обеспечивающих подобие процессов, протекающих при ударных нагрузениях натурной цистерны и ее модели, выбор основных параметров модели цистерны;

разработка и изготовление стенда для исследования ударных нагрузений моделей цистерн, специальных датчиков, выбор и комплектование средств измерения;

исследование особенностей гидродинамических процессов, протекающих в котлах цистерн с помощью динамически-подобных физических моделей;

разработка методики физического моделирования гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн при ударах в автосцепку;

разработка рекомендаций по определению нагрузок, действующих на котлы перспективных конструкций цистерн при различных уровнях их заполнения транспортируемым жидким грузом.

Методика исследования. В основу изучения гидродинамических процессов, возникающих при ударных нагрузениях железнодорожных цистерн, положены экспериментальные методы, а также методы физического моделирования, основанные на теории подобия и анализе размерностей рассматриваемых величин. При этом использовался специально разработанный стенд, позволяющий с помощью динамически-подобных моделей цистерн исследовать влияние различных параметров конструкции на ее нагруженность при продольных ударах. Для измерений и регистрации исследуемых процессов применялись стандартная аппаратура и специально разработанный в ИТМ АН УССР прибор У-11 для определения перемещений свободной поверхности жидкости. Изменение конфигурации свободной поверхности жидкости при ударах фиксировалось также с помощью кинофото-съемки.

Обработка результатов исследований проводилась с использованием методов математической статистики и регрессионного анализа.

Результаты лабораторных исследований, полученные с использованием динамически-подобных моделей цистерн, сопоставлялись с данными натурных испытаний.

Научная новизна. Определены условия подобия, позволяющие моделировать ударные нагрузения железнодорожных цистерн с использованием динамически-подобных физических моделей. Экспериментально исследованы особенности гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн с учетом взаимодействия жид-

НТБ
ДНУЖТ

кого груза с верхней частью полости. Получены уточненные распределения максимальных значений давления жидкого груза при ударах в автосцепку как в области днищ, так и по обечайке котла в зависимости от уровня его заполнения и скорости соударения. Построены регрессионные модели, позволяющие прогнозировать гидродинамическую нагруженность котлов железнодорожных цистерн при различных уровнях их заполнения и силах соударения. Разработана методика физического моделирования гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн при продольных ударах.

Практическое значение работы. Разработанная методика физического моделирования позволяет определять нагруженность элементов конструкции железнодорожных цистерн, транспортирующих жидкие грузы, при ударах в автосцепку во время маневров и переходных режимах движения поездов. Использование предложенной методики позволяет с достаточной для практики точностью определить нагрузки, действующие на котлы железнодорожных цистерн с учетом особенностью воздействия перевозимого жидкого груза. Полученные регрессионные модели дают возможность еще на стадии проектирования определять гидродинамическое давление и его распределение по котлу цистерны при различных уровнях его заполнения в зависимости от ударной нагрузки. Результаты исследований позволяют уточнить расчеты напряженно-деформированного состояния котла и других несущих элементов конструкций при продольных ударах.

Внедрение результатов работы. Данные о гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн, полученные с помощью разработанной методики физического моделирования, использованы Производственным объединением "Азовмаш" при создании перспективных конструкций четырехосной железнодорожной цистерны с увеличенным объемом котла для перевозки бензина и светлых нефтепродуктов (модель И5-И547).

На основании проведенных исследований выявлены особенности распределения давления по котлу цистерны, что позволяет уточнить расчеты его напряженно-деформированного состояния под воздействием продольных ударов через автосцепку и определить рациональные параметры несущих элементов конструкций цистерн.

Результаты исследований, выполненных с помощью динамически-подобных моделей цистерн, позволили существенно сократить время и объем натурных испытаний опытных образцов. Экономический эффект от внедрения подтверждается соответствующими документами.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на

НТБ
ДНУЖТ

Всесоюзной школе-семинаре "Динамика механических систем" (Томск, 1966 г.), Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта (Днепропетровск, 1968 г.), VI Всесоюзном межведомственном симпозиуме "Колебания упругих конструкций с жидкостью" (Новосибирск, 1966 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Перспективы развития вагоностроения" (Москва, 1966 г.), Всесоюзной школе-семинаре "Моделирование динамических процессов взаимодействия тел с жидкостью" (Киев, 1969 г.), научных семинарах отдела колебаний и устойчивости механических систем Института технической механики АН УССР (1965-1969 гг.), городском научном семинаре "Общая механика" (Днепропетровск, 1969 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, включая 2 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из шести глав, включая введение и заключение, списка использованных источников и приложения. Диссертация содержит 130 страниц текста, 49 рисунков, 21 таблицу. Список использованных источников состоит из 86 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе показана актуальность проблемы, рассмотрено современное состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследований.

Основопологающими работами в области исследования динамики подвижного состава являются труды Н.Е.Жуковского, А.М.Годынского-Цвирко, Н.П.Петрова, В.Б.Медея, В.А.Лазаряна, С.В.Вершинского, М.Ф.Вериге, Г.Марье, Ф.Картера и других ученых.

Разработке и совершенствованию методов исследования динамики железнодорожных цистерн посвящены работы А.А.Долматова, И.Н.Кудрявцева, А.А.Львова, М.Ф.Вериге, Л.В.Вадуря, В.Н.Котурянова, В.А.Лазаряна, Е.П.Блокина, М.М.Соколова, М.Л.Коротенко, Л.А.Манашкина, Ю.В.Демина, В.Ф.Ушкалова, Ю.П.Бороненко, В.М.Черкашина, В.С.Плоткина, В.И.Филиппова, Э.К.Яецкого, В.Д.Хусидова, Б.С.Ратнера, А.В.Рыжова, Г.И.Богомаза, В.М.Бубнова, М.Е.Кельриха, Ю.П.Кривовязкина и других.

Анализ работ показывает, что при исследовании нагруженности железнодорожных вагонов-цистерн под воздействием продольных ударов через автосцепку широко используются как теоретические,

НТБ
ДНУЖТ

так и экспериментальные методы.

В большинстве теоретических работ математические модели процессов соударения цистерны при маневрах и в составе поезда строятся на основе теории малых колебаний транспортируемого жидкого груза, что позволяет определять нагрузки в междвагонных соединениях наливных составов, усилия в рессорных комплектах, элементах крепления котла и т.д. В этих случаях вычисляются такие интегральные характеристики, как гидродинамические силы и моменты, действующие на котел со стороны колеблющейся жидкости, однако при этом распределение указанных нагрузок по поверхности котла не может быть определено. Кроме того, не учитывается взаимодействие жидкости с верхней частью полости и различные нелинейные эффекты, которые могут возникать при ударных нагрузениях емкости, содержащей жидкость со свободной поверхностью. Все это не может не влиять на прогнозирование напряженного состояния конструкции, знание которого необходимо уже на стадии ее проектирования. Использование конечно-разностных методов при решении указанной нелинейной задачи сопряжено со значительными вычислительными трудностями, обусловленными, в частности, большими затратами машинного времени и неустойчивостью процесса счета даже на сравнительно коротком интервале времени.

Применение экспериментальных методов, которые являются эффективными при решении задачи о нагруженности котлов железнодорожных цистерн, частично заполненных жидким грузом, позволяет во время испытаний натуральных объектов получать информацию лишь для рассматриваемого образца цистерны. При этом существенно затруднено исследование влияния изменения параметров конструкции, а также поведения самой жидкости в процессе удара, что создает значительные препятствия для изучения особенностей нагружения котла жидким грузом и разработки соответствующих математических моделей. В этом случае наиболее приемлемым является применение методов физического моделирования с использованием динамически-подобных моделей цистерн, котлы которых изготавливаются из прозрачных термопластических материалов. Это позволяет визуализировать исследуемые процессы, использовать кинофото съемку, варьировать в широком диапазоне параметры исследуемой системы.

Вторая глава посвящена разработке методики физического моделирования ударных нагружений железнодорожных цистерн, транспортирующих жидкие грузы. При этом использованы методы, развитые в работах Л.И.Седова, Г.Н.Михишева, Л.Г.Лойцянского и других ученых.

НТБ
ДНУЖТ

Разрабатываемая модель цистерны, предназначенная для определения гидродинамических нагрузок, действующих на котел при ударах в автосцепку, должна быть динамически подобной, то есть соотношения между собственными частотами колебаний жидкости для натуре и модели и собственными частотами самой цистерны (натуре и модели) как твердого тела на упругих элементах должны быть одинаковы. Это обуславливает соответствующий выбор геометрических характеристик котла, масс цистерны и жидкого груза, жесткостей элементов, имитирующих работу межвагонного соединения и рессорных комплектов тележек. Упругие свойства котла во внимание не принимались вследствие существенного различия частот его колебаний как оболочки и собственных частот колебаний жидкости.

Для обеспечения подобия процессов, протекающих в модели и натурном объекте, определены соответствующие масштабные коэффициенты и условия подбора. Рассмотрены два подхода: первый, основанный на анализе исходных уравнений задачи, второй — на использовании комбинированного способа, включающего также анализ размерностей величин, являющихся частью параметров механической системы. В последнем случае одна часть рассматриваемой системы (порожня цистерна) описывается достаточно простой и хорошо изученной системой уравнений, а вторая (жидкий груз) — следующими физическими величинами, характеризующими явление: временем протекания процесса — t ; гидродинамическим давлением на котел — P ; плотностью и кинематической вязкостью жидкого груза — ρ, ν ; отклонением свободной поверхности жидкости от невозмущенного состояния — ξ ; скоростью движения жидкости — v ; характерным линейным размером — L ; ускорением поля массовых сил — g .

В соответствии с первым подходом, система дифференциальных уравнений, описывающая процесс соударения цистерны с вагоном-бойком в вертикальной продольной плоскости ее симметрии, представлена в следующем виде

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x} + m_0 h \ddot{\varphi} + \kappa(x - x_f) - \iint P \cos(n, \hat{x}_i) dS; \\ (J_0 + m_0 h^2) \ddot{\varphi} + m_0 h \ddot{x} + 2\kappa, l, \varphi - \iint P [z \cos(n, \hat{x}_i) - x \cos(n, \hat{z}_i)] dS; \\ m_0 \ddot{z} + 2\kappa, z = - \iint P \cos(n, \hat{z}_i) dS; \\ m_0 \ddot{x} - \kappa(x - x_f) = 0, \end{cases} \quad (I)$$

НТБ
ДНУЖТ

где m_0 - масса обрессоренной части цистерны; m_f - масса вагона-бойка; h_0 - высота центра масс обрессоренной части цистерны от - носительно поперечной горизонтальной оси; κ - жесткость меж-вагонной связи; κ_1 - жесткость рессорных комплектов тележки; $2l$ - база цистерны; x, z, φ - соответственно продольное и вертикальное смещения, угол поворота цистерны в инерциальной системе координат; S - смоченная поверхность котла; n - единичный вектор внешней нормали к смоченной поверхности; P - давление жидкости на стенки котла.

Колебания жидкого груза в котле цистерны описаны системой, состоящей из уравнений Навье-Стокса и уравнения несжимаемости жидкости

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial y_1} + w \frac{\partial u}{\partial z_1} &= G_{x1} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_1} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z_1^2} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial y_1} + w \frac{\partial v}{\partial z_1} &= G_{y1} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y_1} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z_1^2} \right); \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x_1} + v \frac{\partial w}{\partial y_1} + w \frac{\partial w}{\partial z_1} &= G_{z1} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z_1} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z_1^2} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial y_1} + \frac{\partial w}{\partial z_1} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где x_1, y_1, z_1 u, v, w - соответственно координаты и проекции вектора скорости движения жидкости на оси, связанной с котлом системы координат; $G_{x1} = -\ddot{x}$; $G_{y1} = 0$; $G_{z1} = -g$.

В целом уравнения (1) и (2) при соответствующих начальных и граничных условиях описывают совместные колебания натурной цистерны и жидкости при ударных нагружениях в автосцепку.

С помощью масштабных преобразований

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \frac{t_M}{t_N}, \quad \kappa_A = \kappa_x = \kappa_{x\delta} = \kappa_{\ddot{x}} = \frac{a_M}{a_N}, \quad \kappa_{m_0} = \kappa_{m\delta} = \frac{m_M}{m_N}, \\ \kappa_{J_0} &= \frac{J_{0M}}{J_{0N}}, \quad \kappa_2 = \kappa_x = \kappa_{x\delta} = \kappa_{\ddot{x}} = \frac{l_M}{l_N}, \quad \kappa_P = \frac{P_M}{P_N}, \end{aligned}$$

осуществляется переход от уравнений (1) и (2) к уравнениям, описывающим колебания модели цистерны. Индекс „М“ в принятых здесь обозначениях соответствует физическим величинам натурного объекта, а „N“ - модели. Масштабы гидродинамических величин определяются с использованием следующих критериев, которые получаются из уравнений (2), записанных в безразмерной форме

$$E_u = F/\rho v^2 = idem \quad - \text{ критерий Эйвера;}$$

$$N_f = F/\rho v^2 L^2 = idem \quad - \text{ критерий Ньютона;}$$

$$F_r = \frac{v^2}{gL} = idem \quad - \text{ критерий Фруда;}$$

$$S_h = \frac{L}{v^2} = idem \quad - \text{ критерий Струхаля.}$$

Здесь F - гидродинамическая сила.

Критерий Рейнольдса ($R_p = \frac{vL}{\nu}$) в этом случае не учитывается, т.к. исследуются кратковременные процессы в емкости, об- ладающей, кроме того, значительным конструкционным демпфиро- ванием.

В соответствии с инвариантностью выполненных масштабных преобразований получены следующие условия, обеспечивающие подо- бие рассматриваемых динамических процессов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_{0N}}{\rho_N l_N^3} = \frac{m_{0n}}{\rho_n l_n^3}; \quad \frac{J_{0N}}{m_{0N} l_N^2} = \frac{J_{0n}}{m_{0n} l_n^2}; \\ \frac{a_{цн} l_n}{a_n} = \frac{a_{цм} l_m}{a_m}; \quad \frac{z_n}{l_n \varphi_n} = \frac{z_m}{l_m \varphi_m}; \\ \frac{m_{0N} a_n}{k_N x_N} = \frac{m_{0n} a_n}{k_n x_n}; \quad \frac{k_N x_N}{k_{цн} z_n} = \frac{k_n x_n}{k_{цм} z_m} \end{array} \right. \quad (3)$$

Условия (3) получаются также и с использованием подхода, при котором проводится анализ размерностей величин, характери- зующих колебания жидкости в котле цистерны.

Для определения параметров модели цистерны в качестве ос- новных масштабных коэффициентов выбраны $\kappa_p, \kappa_a, \kappa_f$, имеющие следующие численные значения

$$\kappa_a = 1; \quad \kappa_p = 0,5-1,5; \quad \kappa_f = 0,1 \quad (4)$$

В этом случае масштабы производных величин могут быть представ- лены в виде:

$$\begin{array}{l} \kappa_{m_0} = \kappa_p \cdot 10^{-3}; \quad \kappa_{J_0} = \kappa_p \cdot 10^{-5}; \\ \kappa_k = \kappa_p \cdot 10^{-2}; \quad \kappa_{k_1} = \kappa_p \cdot 10^{-2}; \\ \kappa_\varphi = 1; \quad \kappa_{a\varphi} = 10. \end{array} \quad (5)$$

С использованием соотношений (4) и (5) были изготовлены модели четырехосной цистерны, позволяющие провести две серии эк- спериментов. В первом случае учитывалась замена в модели натурального

НТБ
ДНУЖТ

груза (бензина) водой, т.е. коэффициент K_p выбирался равным 1,2. Во втором случае моделировалась ситуация, когда экспериментальный и натуральный объекты заполнялись водой, т.е. $K_p = 1$, что соответствует случаю экспериментальной отработки конструкций цистерн. Котел модели цистерны выполнялся из прозрачного оргстекла и представлял собой цилиндрическую обечайку заданного радиуса, на торцах которой закреплялись съемные днища. Рама модели цистерны представляла собой прямоугольную конструкцию, собранную из алюминиевых швеллеров, соединенных между собой болтами, и укрепленную в средней части двумя поперечными балками для обеспечения жесткости и прочности. Такая конструкция рамы позволяет изменять ее массу и момент инерции путем размещения дополнительных грузов. В концевых частях рамы предусмотрены ложементы для установки котла. С одной стороны платформы установлено устройство, моделирующее работу маявальной связи. Оно представляет собой упругие элементы, жесткость которых может регулироваться с помощью сменных блоков цилиндрических пружин, деформируемых в продольном направлении.

Для исследований ударных нагрузений модели цистерны при соударении с вагоном-бойком разработан специальный стенд, конструкция которого позволяет получать дискретные значения скорости накатывания бойка с шагом 0,035 м/с в пределах от 0,1 до 2 м/с. Разброс значений скорости, задаваемой бойку при запуске его с одного и того же положения, составляет не более 2 %. Масса бойка может изменяться в пределах от 24 до 120 кг.

Перед проведением ударных испытаний котел модели цистерны оснащался специально разработанными датчиками перемещения свободной поверхности жидкости, а также стандартными датчиками, для измерения давления, ускорения и скорости движения модели, силы в момент соударения.

В третьей главе приведены результаты исследования особенностей ударного взаимодействия котла железнодорожной цистерны и транспортируемого жидкого груза. Исследования проводились с использованием динамически-подобной физической модели, параметры которой соответствуют масштабным коэффициентам (4) и (5) при $K_p = 1$. Рассматривались различные уровни заполнения котла и силы соударения, изменяющиеся дискретно от 0,5 до 5 кН. Датчики давления располагались в вертикальной продольной плоскости симметрии котла соответственно на днищах и верхней образующей.

Установлено, что при численных значениях силы удара

НТБ
ДНУЖТ

значение и распределение гидродинамического давления на стенки котла существенно зависят от уровня его заполнения жидким грузом. Показано, что при недоливах, меньших $\frac{3}{4}R$, в котле цистерны могут наблюдаться скачки давлений, возникающие в момент взаимодействия свободной поверхности жидкости с верхней частью емкости. При полном заполнении котла изменение давления в рассматриваемых точках его верхней образующей происходит достаточно плавно и практически синхронно. Изменение давлений на переднее днище и в том, и в другом случаях носит монотонный характер. С уменьшением уровня заполнения наблюдается значительное снижение амплитуд давлений, пики при этом сглаживаются, а записи на осциллограммах приобретают более плавный характер.

Для получения пространственной картины нагружения котла жидкостью при продольных ударах датчики давления устанавливались не только вдоль верхней образующей емкости, но и в ряде ее поперечных сечений. По результатам эксперимента построены эпюры максимальных значений давления в вертикальных поперечных сечениях котла. Из полученных эпюр следует, что емкость нагружается в поперечных сечениях практически равномерно, то есть эпюры давления концентричны относительно стенок емкости. По цилиндрической части котла при наличии указанных недоливов пробегает кольцевая волна давления, скорость распространения которой существенно зависит от уровня заполнения котла и силы соударения. Использование датчиков перемещения свободной поверхности жидкости и кинофото съемки позволяет в любой момент времени определить конфигурацию свободной поверхности жидкости при продольных ударах и получить дополнительные данные для построения эпюр нагружения котла жидким грузом. Полученные данные позволяют заключить, что при экспериментальной оценке нагруженности котла жидкостью достаточно получить информацию о нагрузках, действующих в продольно-вертикальной плоскости его симметрии.

Следует отметить, что для полного заполнения емкости максимальное давление приходится на переднее днище. В случаях, когда появится недолив, происходит перераспределение давлений по котлу. При этом максимальные значения давления могут возникать на цилиндрической части котла и превышать давления на переднее днище в 1,5-2 раза.

Специалось также влияние начального состояния свободной поверхности жидкости, формы днищ, характеристики межвагонной связи и податливости рессорных комплектов на значения максимальных нагрузок, действующих на котел цистерны со стороны жидкого груза.

Показано, что при плоских днищах давления по всем датчикам, в основном, больше, чем для котла со сферическими днищами. Учет колебаний галоопирования как при плоских, так и при сферических днищах модели приводит к некоторому уменьшению максимальных давлений. При этом зависимости давления от уровня недослива жидкости имеют аналогичный характер. В целом получено, что максимальные значения давления возникают при недолIVE $H = 0,05-0,2R$. При достаточно больших силах соударения, когда происходит полное сжатие пружины, соответствующее максимальному ходу поглощающего аппарата, включается вторая пружина с большей жесткостью и реализуется билинейная характеристика межвагонной связи. Это приводит к появлению на осциллограмме характерного пика, обуславливающего закрытие поглощающего аппарата натурной автосцепки. Увеличение продольной силы приводит к соответствующему росту давления жидкости. В результате исследований было показано, что соответствующим выбором жесткости можно заменить билинейную пружину линейной, обеспечивая при этом одинаковый уровень давлений жидкости на стенки емкости.

В четвертой главе по данным лабораторных испытаний построены расчетные модели для определения воздействия жидкости на стенки емкостей, имеющих форму котлов железнодорожных цистерн, при продольных ударах.

На первом этапе был использован одномерный регрессионный анализ как один из наиболее широко распространенных статистических методов. Для обработки результатов была составлена программа на языке Фортран для ЭВМ БЭСМ-6, осуществляющая по максимальному согласию выбор наилучшей регрессионной зависимости. Полученные одномерные регрессионные модели дают представление о характере влияния какого-либо одного фактора на интересующий параметр, а также позволяют проводить экспресс-обработку экспериментальных данных.

Чтобы иметь возможность прогнозировать нагруженность котла цистерны жидким грузом при различных недоливах и силах соударения в некоторых диапазонах их изменения, построены двумерные регрессионные модели, которые являются полиномами с постоянными коэффициентами. Для определения непрерывного распределения давлений по баку в вертикальной продольной плоскости его симметрии на их основе получены трехмерные обобщенные регрессионные зависимости, имеющие следующий вид

$$\left\{ P'(\ell, H, S) \text{ при } R \leq \ell \leq \ell' \right.$$

НТБ
ДНУЖТ

$$P = \begin{cases} P''(\ell, H, S) & \text{при } \ell' < \ell < \ell_{\max}(H, S) \\ 0,5\kappa H < S < 3\kappa H, & 0,01\text{ м} < H < 0,16\text{ м}, \end{cases} \quad (6)$$

где ℓ' – расстояние, отсчитываемое от нижней части переднего дна до последнего смоченного жидкостью датчика, ℓ – текущее значение координаты.

В выражениях (6) $P'(\ell, H, S)$ и $P''(\ell, H, S)$ представим в следующем виде:

$$P'(\ell, H, S) = A_0(\ell) + A_1(\ell)H + A_2(\ell)S + A_3(\ell)HS + A_4(\ell)H^2. \quad (7)$$

$$P''(\ell, H, S) = P'(\ell', H, S) - P'(\ell', H, S) \frac{\ell}{(\ell_{\max} - \ell')} \quad (8)$$

Коэффициенты A_0, A_1, \dots, A_4 в выражении (7) отыскиваются в виде полиномов наилучшего приближения

$$A_i(\ell) = \sum_{\kappa=0}^4 \beta_{\kappa}^i \ell^{\kappa} \quad (9)$$

Значения β_{κ} отыскиваются из условия минимума для максимума модуля отклонения

$$\max_{0 \leq \ell \leq 5} \left| a_{\kappa} - \sum_{j=0}^4 \beta_j^{\kappa} \ell^j \right| = \min,$$

где $(\kappa = \overline{0,5})$ – числовые значения коэффициентов, взятые из двумерных моделей.

Коэффициенты для обобщенной многомерной регрессионной модели (6) приведены в таблице.

Таблица

Коэффициенты β_{κ} обобщенной модели

$A_i(\ell)$	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
A_0	-0,6514	4,0600	-9,446	10,059	-4,738
A_1	9,03	-63,63	151,39	-136,047	40,935
$A_2 \cdot 10^{-3}$	2,497	32,647	96,926	-620,776	597,773
$A_3 \cdot 10^{-3}$	42,137	-241,521	-70777	1516,375	-1400,491
A_4	-24,706	169,166	497,901	520,675	-202,674

НТБ
ДНУЖТ

В целом полученные зависимости позволяют прогнозировать нагруженность исследуемой емкости при различных уровнях ее заполнения и силах соударения.

Пятая глава посвящена определению расчетных значений давления жидкости на котел железнодорожной цистерны (мод. 15-1547) по результатам физического моделирования. В данном случае параметры модели цистерны, с помощью которой проводились лабораторные испытания, выбирались в соответствии с $K_p = 1,2$. Значения давлений, усилий, ускорений, скоростей и перемещений определялись для натурального объекта путем деления указанных величин, найденных для модели, на соответствующие масштабные коэффициенты. Таким образом совершается переход к соответствующим величинам натурной цистерны по данным лабораторных испытаний.

Регрессионные зависимости, позволяющие с учетом выбранных масштабных коэффициентов, получать распределения максимальных значений давления жидкости на котел рассматриваемой натурной цистерны и конфигурацию свободной поверхности жидкости в зависимости от силы соударения и уровня заполнения котла, могут быть построены путем соответствующего аффинного преобразования выражений (6).

Получено, что если значения давлений на переднее днище котла рассматриваемой натурной цистерны, найденные экспериментально с помощью физической модели, достаточно хорошо согласуются с рассчитанными по "Нормам расчета и проектирования вагонов ...", то максимальная нагруженность цилиндрической части котла при эксплуатационном недоливе будет примерно в два раза выше расчетных по "Нормам...". Это следует принимать во внимание при оценке напряженно-деформированного состояния конструкции цистерны при продольном ударе.

Для проверки разработанной выше методики физического моделирования динамических процессов, протекающих при ударных нагрузках железнодорожных цистерн, результаты лабораторных испытаний были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными для натурального объекта. В качестве объекта для натуральных испытаний была выбрана рассмотренная ранее четырехосная железнодорожная цистерна (мод. 15-1547) с увеличенным объемом котла для перевозки бензина и светлых нефтепродуктов.

При проведении натуральных ударных испытаний измерялось гидродинамическое давление жидкости на котел цистерны в точках, аналогично их расположению на модели с учетом геометрического подобию полости натурального объекта и модели цистерны. С помощью динамомет-

НТБ
ДНУЖТ

рической автосцепки измерялась также сила соударения. Скорость накатывания вагона-бойка определялась с помощью двух пикет-отметчиков.

Показано, что результаты, полученные с использованием модели и натурального объекта, достаточно хорошо согласуются между собой.

В целом выполненные исследования позволили разработать методику определения гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн при ударах в автосцепку с использованием физического моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований и разработок получены следующие научные и практические результаты.

1. На основе методов теории подобия и анализа размерностей с помощью подобных моделей разработана методика физического моделирования ударных нагружений железнодорожных цистерн с жидкими грузами.

Средлены условия, обеспечивающие подобие изучаемых явлений, и установлены коэффициенты масштабных преобразований.

2. Разработан комплекс испытательного оборудования, включающий в себя ударный стенд, модели цистерны и комплект аппаратуры для измерения давления, перемещения свободной поверхности жидкости, ускорений котла и усилий в автосцепке.

3. С помощью подобных физических моделей исследованы гидродинамические процессы, протекающие в котле железнодорожной цистерны при продольных ударах. Установлено, что давление жидкости и характер его распределения по котлу существенным образом зависят от уровня заполнения и скорости соударения. Показано, что для уровней недолива меньше $3/4 R$ возможно появление ударной волны давления, фронт которой распространяется от соударяемого конца вдоль обечайки. Оболочка котла при этом нагружается в поперечных сечениях практически равномерно.

Максимальные значения давления при указанном ударном нагружении возникают в сечениях первой трети котла и могут в 1,5 - 2 раза превышать давления на переднее днище. Определено, что уровень давления на оболочку котла возрастает в случаях, когда днища его плоские или отсутствуют колебания галолирования.

4. Методами скоростной кинофотосъемки и с помощью специально разработанных потенциометрических датчиков на прозрачных моде-

НТБ
ДНУЖТ

лях котлов и натуральных объектах исследовано поведение свободной поверхности жидкости в котле цистерны при ударе. Установлено, что при уровнях заполнения котла, близких к эксплуатационному, ударная гидродинамическая нагрузка может распространяться вдоль цилиндрической части емкости и зона ее воздействия составляет до 80 % длины верхней образующей.

5. По данным лабораторных испытаний с использованием разработанного программного обеспечения построены одномерные и многомерные регрессионные модели, позволяющие получать распределения давления жидкого груза по котлу натурной цистерны в зависимости от уровня его заполнения и силы соударения.

6. Разработана методика определения гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн с применением динамически-подобных моделей, позволяющая на стадии проектирования оценить параметры разрабатываемой конструкции с учетом воздействия транспортируемого жидкого груза. На основе предложенной методики исследована гидродинамическая нагруженность большегрузных четырехосных цистерн с увеличенным объемом котла при ударах в автосцепку.

Результаты выполненных исследований использованы п/о "Азов-маш" при создании цистерны мод. 15-1547 для перевозки бензина и светлых нефтепродуктов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Экспериментальные и теоретические исследования динамики четырехосной цистерны при ударных нагружениях / Г.И. Богомаз, М.Б. Кельрих, Ю.П. Кривовязяк, Ю.Н. Биличенко // Динамика, нагруженность и надежность подвижного состава: Межвуз. сб. науч. тр. - Днепропетровск: ДИИТ. - 1965. - С. 36-43.
2. Исследование колебаний и нагруженности четырехосных цистерн с жидкими грузами при ударах в автосцепку / Г.И. Богомаз, В.П. Германчук, Ю.П. Кривовязяк, Ю.Н. Биличенко // Сб. науч. тр. - Краматорск: НИИПТмаш. - 1965. - С. 100-105.
3. Луковский И.А., Богомаз Г.И., Биличенко Ю.Н. Экспериментальные исследования нелинейных колебаний жидкости в жестких баках // Динамика механических систем: Тез. докл. Всесоюз. шк. семинар. - Томск, 1965. - С. 12-13.
4. Исследование динамических процессов при колебаниях жидкости в баках / Г.И. Богомаз, Ю.Н. Биличенко // Труды ИГиМ АН УССР. 1967. - С. 67-70.
5. А.С. 1346506 СССР, ЖИ В 65 08/12, 90/22, В 61 5/00. Цистерна для жидкости / Ю.Н. Биличенко, Ф.П. Белый, Г.И. Богомаз

5463a

и др. (СССР). – 3 е. : 2 ил.

6. Моделирование ударных нагрузок на железнодорожных цистернах, транспортирующих жидкие грузы / Г.М.Богомаз, В.Н.Баличенко, Д.Д.Махов и др. // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез.докл.Всесоюз.конф. – Днепропетровск, 1986. – С.34.
7. Определение нагруженности железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при соударении / Г.М.Богомаз, В.П.Кривошанок, В.Н.Баличенко, М.В.Кадрич // Перспективы развития вагоностроения: Тез.докл.Всесоюз.конф. – Москва, 1986. С.40.
8. А.С. БЗ8076 СССР, МКМ 01 М7/00. Стенд для динамических испытаний / В.Н.Баличенко, Е.П.Василин, Г.М.Богомаз и др. (СССР).



БЛАЩЕНКО Юрий Николаевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОТЕЛОВ ЖЕЛЕЗНО-
ДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ПРИ УДАРАХ В АВТОСИСТЕМУ**

**09.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга
поездов**

Подписано к печати 25.05.90. БТ 50370.

**Формат 60 x 84 1/16 Бумага для многократных аппаратов.
Усл.печ.л. 1,0 Уч.-изд.л. 1,0, Тираж 100 экз. Зак. 560
Бесплатно.**

Участок оперативной полиграфии ДИИТа.

320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Академика В.А. Лазаряна, 2.