

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АДМИНИСТРАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

ЧЕРНОМАШЕНЦЕВА Юлия Генриховна

УДК 625.245.6: 532.5+531.66

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН
ПРИ УДАРАХ В АВТОСЦЕПКУ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЖИДКОГО ГРУЗА

05.22.07 - Подвижной состав железных дорог
и тяга поездов

А в т о р е ф р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск 1993



00814783 (V)

Робота виконана в Інституті
Академії наук України

Научні керівники: Заслужений працівник
вищої школи України,
доктор технічних наук,
професор Е. П. БЛОХІН,

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Г. І. БОГОМАЗ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор Ю. П. БОРОНЕНКО

кандидат технічних наук,
доцент І. Г. БАРЕБАС

Ведуче підприємство: концерн "Азовмаш"

Захиста проходить "1" шоло 1993 г.
в 14 ч. 00 мин. на засіданні спеціалізованого
ученого ради ДІІ4.07.01 при Дніпропетровському інституті
інженерів залізничного транспорту
по адресу: 320700, ГСП, г. Дніпропетровськ,
ул. Акад. Лазаряна, 2

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці
інституту.

Автореферат розослан "31" шоло 1993 г.

Учений секретар
спеціалізованого ради,
кандидат технічних наук,
доцент

Петрович
Д. В. ПЕТРОВИЧ

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальность темы. В современных условиях, когда транспортировка жидких грузов по железным дорогам носит массовый характер, большое внимание уделяется вопросам создания и модернизации наливного подвижного состава различного назначения. Надежность и долговечность таких конструкций в значительной мере определяются их нагруженностью при ударах, поскольку именно ударные нагрузки являются наиболее интенсивными и могут приводить к аварийным ситуациям. Особенно опасными такие нагрузки являются при транспортировке в цистернах ядовитых, легковоспламеняющихся, экологически опасных грузов. Поэтому на этапах проектирования новых и модернизации уже существующих конструкций цистерн, предназначенных для перевозки различных жидкостей, необходимо прогнозирование их динамической нагруженности, возникающей при маневровых соударениях и переходных режимах движения поездов.

На формирование указанных динамических нагрузок существенное влияние оказывает подвижность транспортируемой в цистерне жидкости. Выполненные ранее теоретические исследования в большинстве своем рассматривают колебания жидкого груза в котле железнодорожной цистерны в рамках линейной теории, без учета различных нелинейных эффектов. Такой подход позволяет получать интегральные оценки нагруженности котла при воздействии на него транспортируемого жидкого груза и определять усилия, возникающие в межвагонных соединениях при продольных ударах. При этом распределение гидродинамического давления в котле, как правило, описывается по упрощенной методике, изложенной в Нормах, что не всегда соответствует действительности. При решении ряда практических задач, связанных с исследованием динамических процессов, протекающих в цистернах при ударах в автосцепку, а также при определении давления жидкости в различных точках котла необходимо рассматривать немалые (т.е. нелинейные) колебания жидкого груза и учитывать его взаимодействие с верхней частью котла. Уточнения также требует описание механизма взаимодействия экипажей через автосцепку при продольных ударах. Поэтому актуальной и важной задачей является разработка математических моделей, создание эффективных алгоритмов и вычислительных программ для прогнозирования нагруженности железнодорожных цистерн при ударных воздействиях через автосцепку с учетом нелинейных колебаний жидкого груза.

Цель работы заключается в совершенствовании методики исследования динамической нагруженности железнодорожных цистерн путем создания математической модели, учитывающей нелинейные колебания жидкого груза в котле и особенности взаимодействия экипажей при ударах в автосцепку.

Методика исследований. При построении математической модели используется идея редукции континуальной задачи о колебаниях жидкости в полости к некоторой конечномерной задаче о движении материальной точки и твердого тела как механического аналога исходной системы. Гидродинамические параметры нелинейного аналога определяются при малых колебаниях жидкого груза, вызывающих отклонения свободной поверхности жидкости не более, чем на $0,1R$ (где R — радиус цилиндрической части котла), как параметры линейного маятникового аналога колебаний жидкости в емкости. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний жидкого груза параметры корректируются на основе данных модельного ударного эксперимента. Необходимые переходы от модели к натурному объекту осуществляются на основании теории подобия. Обработка экспериментальных данных и построение вспомогательных зависимостей производится методами регрессионного анализа. Интегрирование уравнений движения цистерны, частично заполненной жидким грузом, осуществляется методом "прогноз-коррекция".

Задачи исследований.

1. Разработка математической модели конечных (немалых) колебаний жидкого груза в котле цистерны с учетом нелинейных эффектов, вызванных взаимодействием жидкости с верхней частью котла.
2. Определение гидродинамических параметров нелинейного механического аналога системы "котел- жидкий груз".
3. Построение математической модели работы междугонного соединения с учетом вертикального взаимодействия автосцепок с конструкциями вагонов при продольных ударах.
4. Создание алгоритмов и вычислительных программ для численной реализации разработанных математических моделей на ЭВМ.
5. Проведение исследований динамических процессов и нагруженности цистерн при маневровых соударениях и движении в составе поезда. Сопоставление результатов, полученных при использовании различных расчетных схем цистерн. Разработка практических рекомендаций.

Научная новизна работы состоит в создании методики, позволяющей прогнозировать нагруженность железнодорожных цистерн при продольных ударах в автосцепку с учетом нелинейных колебаний жидкого

груза и особенностей взаимодействия железнодорожных экипажей при соударениях.

На базе механического аналога системы "котел-жидкий груз" построена математическая модель нелинейных колебаний жидкости в котле железнодорожной цистерны и разработан алгоритм определения ее гидродинамических параметров.

Предложен подход, с помощью которого могут быть оценены наибольшие давления в различных точках котла цистерны при продольных ударах.

Проведен анализ влияния нелинейных колебаний свободной поверхности жидкости на процессы формирования нагрузок, действующих на цистерны при соударениях и движении в составе поезда.

Практическая ценность. Разработано математическое и программное обеспечение для моделирования на ЭВМ динамики цистерн, колебание жидкости в которых не являются малыми. Созданные математические модели и реализующие их программы могут использоваться для решения широкого круга задач, связанных с нестационарными колебаниями объектов, содержащих емкости, частично заполненные жидкостью, при их транспортировке по железным дорогам.

Использование предложенной в работе методики исследования позволяет получить не только интегральные оценки, но и распределения наибольших давлений жидкости по котлу. Это, в свою очередь, дает возможность на стадии проектирования обоснованно выбирать параметры котла и других несущих элементов конструкции цистерны.

На базе разработанной математической модели предложена методика проведения натурных испытаний цистерн, которая позволяет оценить наибольшую нагруженность котла при заданной скорости соударения. Учитывается, что наибольшие значения гидродинамического давления могут наблюдаться при ударе в цистерну, жидкость в которой находится перед ударом в определенной фазе колебаний относительно котла. Даны рекомендации по снижению уровня продольных сил и прогибов резервуарных комплектов цистерн при пуске в ход наливного поезда после его предварительного осаживания.

Обоснованность и достоверность научных положений вытекает из использования при математическом моделировании динамики цистерны, транспортирующей жидкость со свободной поверхностью, физических обоснованных допущений, а также результатов модельного эксперимента; применения в исследованиях апробированных методов численного решения системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Результаты расчетов, выполненных с использованием разработанной

математической модели, учитывающей нелинейные колебания жидкого груза, согласуются при малых амплитудах его колебаний с известными решениями, полученными в рамках линейной теории. Проведено качественное и количественное сопоставление результатов расчета динамической нагруженности цистерн при продольных ударах с данными натурных экспериментов.

Внедрение результатов. Предложенные в диссертации методика, алгоритмы и программы, а также результаты исследований использованы в Конструкторском бюро специального машиностроения (г. Санкт - Петербург) при прогнозировании нагруженности специализированных железнодорожных поездов, транспортирующих твердые амортизированные и жидкие грузы, а также в МНИПКТД концерна "Азовмаш" (г. Мариуполь) при создании конструкций железнодорожных цистерн.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на УП Всесоюзной конференции " Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава " (г. Днепропетровск, 1988); конференциях молодых ученых Института технической механики АН Украины; Всесоюзной школе-семинаре " Моделирование динамических процессов взаимодействия в системе тел с жидкостью " (г. Киев, 1989); II Всесоюзной конференции " Нелинейные колебания механических систем " (г. Горький, 1990); УП Всесоюзном межотраслевом симпозиуме " Колебания упругих конструкций с жидкостью " (г. Новосибирск, 1991); III конференции " Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, прочность и надежность подвижного состава " (г. Днепропетровск, 1992). В целом результаты работы представлены на семинаре отдела колебаний и устойчивости механических систем ИТМ АН Украины (г. Днепропетровск, 1991) и на заседании городского семинара "Общая механика " (г. Днепропетровск, 1993).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (108 источников). Объем работы 167 страниц, из которых 91 страница машинописного текста, 49 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цель работы и задачи исследования.

В первой главе приведен обзор современных методов исследования динамики и нагруженности цистерн, а также динамики железнодорожных поездов, в том числе транспортирующих жидкие грузы. Отмечен большой вклад в решение этих задач таких ученых, как В.А.Лазарян, Е.П.Блохин, И.Г.Барбас, Ю.П.Бороненко, Г.И.Богомоз, В.М.Бубнов, С.В.Вершинский, П.Т.Гребенюк, Ю.В.Демин, А.А.Долгатов, В.Н.Котуранов, Н.Н.Кудрявцев, Б.Г.Кеглин, М.Л.Коротенко, С.И.Конешенко, М.Б.Кальрих, А.А.Львов, Л.А.Лавишкин, Л.Н.Никольский, Н.А.Панькин, А.В.Рыков, М.М.Соколов, Б.Ф.Ушкелов, В.И.Филиппов, В.Д.Хусидов, Ю.М.Чермаши и ряда других авторов.

Для анализа теоретических и экспериментальных методов решения задачи о колебаниях жидкости в емкости, базирующихся на основополагающих работах Л.А.Лувовского, Г.И.Милишевца, П.И.Моисеева, Г.С.Нариманова, А.А.Петрова, Б.Л.Рабиновича, А.А.Самарского и других, а также на исследованиях ряда зарубежных авторов.

Как следует из выполненного обзора работ, наиболее эффективными при построении математической модели цистерны являются методы, позволяющие перейти от системы "тело-жидкость" к дискретной механической системе с конечным числом степеней свободы. При этом математическая модель должна наиболее полно соответствовать реальной системе и, вместе с тем, быть достаточно простой и удобной для практической реализации на ЭВМ. В этой связи к решению задачи о нелинейных (нелинейных) колебаниях транспортируемой жидкости также целесообразно применить подход, связанный с использованием механической аналогии, привлекая для получения гидродинамических параметров аналога ограниченное число данных модельного ударного эксперимента. Это позволяет избежать трудностей численного решения нелинейных уравнений движения жидкости (с использованием конечно-разностных или других методов), сохраняя при этом достоверность и обзорность полученных результатов.

Во второй главе приведена математическая модель для исследования нагруженности железнодорожных цистерн при ударах в автоцепку с учетом нелинейных колебаний жидкого груза и особенностей взаимодействия экипажей при соударениях.

Предполагается, что котел цистерны является абсолютно твердым телом.

Цистерна движется по горизонтальному прямому пути и совершает колебания в продольно-вертикальной плоскости симметрии. Сцепленные автоцепки представляют собой безмассовый стержень, шарнирно прикрепленный к соединяемым вагонам. Предполагается, что характеристики этого стержня соответствуют реальным характеристикам межвагонного соединения. Силы в рессорных комплектах моделируются с помощью упругих элементов с сухим трением.

Поскольку интегральное воздействие жидкого груза на котел цистерны характеризуется положением центра масс жидкости, то искомым механический аналог колебаний жидкого груза в котле можно представить в виде механической системы, состоящей из твердого тела и материальной точки, движущейся по отношению к телу аналогично центру масс жидкости при ее колебаниях в котле цистерны (рис. 1). Траектория, по которой перемещается центр масс, как показали исследования, может быть определена с помощью расчета на ЭВМ или обработки кинограмм ударного эксперимента в предположении, что в каждый момент времени свободная поверхность транспортируемой жидкости заменена плоскостью. Уравнение траектории $Z_n = Z_n(x_n)$ в этом случае получается как полином 4-ой степени наилучшего равномерного приближения по таблично заданным значениям функции. При этом устанавливается также зависимость между продольным перемещением центра масс жидкости и отклонением ее свободной поверхности от невозмущенного состояния.

Для обеспечения преемственности между известным механическим аналогом малых колебаний жидкого груза и разрабатываемой нелинейной моделью предполагается, что вся транспортируемая в цистерне жидкость делится на две части, одна из которых считается подвижной относительно котла (ее масса составляет массу m_n материальной точки, движущейся по траектории, которая получена параллельным переносом кривой $Z_n = Z_n(x_n)$), а вторая часть присоединяется к котлу, составляя с ним одно твердое тело массой m_0 . Считается, что масса m_n подвижной части жидкости является переменной, зависящей от амплитуды колебаний жидкого груза. При движениях цистерны, вызывающих небольшие (менее $0,1R$) отклонения свободной поверхности жидкости от невозмущенного состояния, полагается, что масса m_n равна присоединенной массе, соответствующей первому тону колебаний жидкости в горизонтально расположенной цилиндрической емкости. При амплитудах колебаний жидкого груза, превышающих $0,1R$, значение массы m_n изменяется по линейному закону. Угол α наклона прямой $m_n = m_n(x_n)$ определяется с привлечением данных

Расчетная схема цистерны

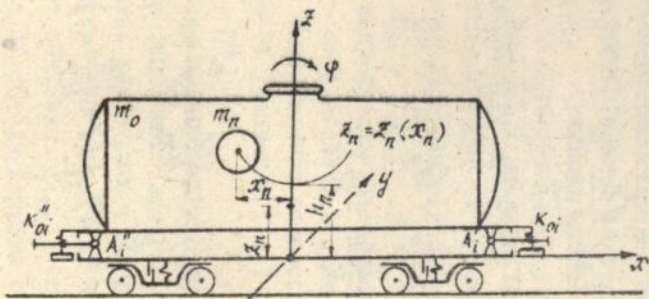


Рис. 1

Схема сил, действующих на автосцепки i -го межвагонного соединения

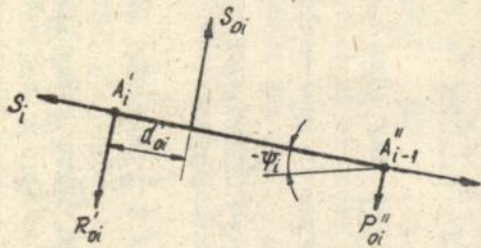
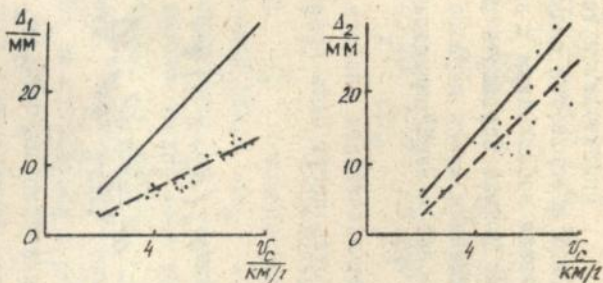


Рис. 2

Прогобы рессорных комплектов цистерны при даде ($H = 0,77R$)



- - эксперимент
- - без учета вертикального взаимодействия
- - - с учетом вертикального взаимодействия

Рис. 3

Наибольшие растягивающие силы при пуске поезда в ход после осаживания

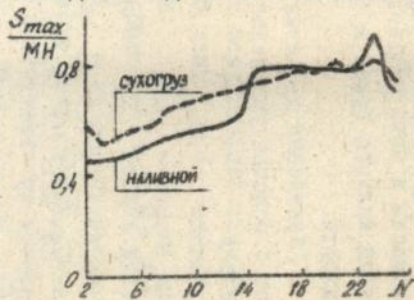


Рис. 4

модельного эксперимента в зависимости от силы удара в автосцепки цистерны. Корректировка массы m_n производится таким образом, чтобы максимальные отклонения свободной поверхности жидкости от невозмущенного состояния соответствовали наблюдаемым в эксперименте. Предполагается, что масса m_n не должна превышать массу всей жидкости и быть меньше, чем присоединенная масса первого тона колебиний жидкого груза в вертикально расположенной цилиндрической емкости.

Уравнения движения описанного механического аналога, выведенные с помощью уравнений Лагранжа II рода, могут быть представлены в виде :

$$\left. \begin{aligned}
 & (m_0 + 2m_r + \frac{n \cdot J_r}{r^2} + m_n) \ddot{x} + [m_0 z_c + m_n (h_n + z_n)] \ddot{\varphi} + \\
 & + m_n \ddot{x}_n (1 + \varphi \frac{\partial z_n}{\partial x_n}) = -2m_n \dot{\varphi} \dot{z}_n - m_n \frac{\partial^2 z_n}{\partial x_n^2} \dot{x}_n^2 \varphi + Q_1; \\
 & [(m_0 + 2m_r + \frac{n \cdot J_r}{r^2}) z_c + m_n (h_n + z_n)] \ddot{x} + [J_0 + m_n (h_n + z_n)] \ddot{\varphi} + \\
 & + m_n x_n^2 \ddot{\varphi} - m_n x_n \ddot{z}_n + m_n \ddot{x}_n [(h_n + z_n) (1 + \varphi \frac{\partial z_n}{\partial x_n}) + \\
 & + x_n (\varphi - \frac{\partial z_n}{\partial x_n})] = -m_n \varphi (h_n + z_n) \frac{\partial^2 z_n}{\partial x_n^2} \dot{x}_n^2 - \\
 & - 2m_n (h_n + z_n) \dot{z}_n \dot{\varphi} - 2m_n x_n \dot{x}_n \dot{\varphi} + m_n \frac{\partial^2 z_n}{\partial x_n^2} \dot{x}_n^2 x_n + \\
 & + m_0 g z_c \varphi + m_n g \varphi (h_n + z_n) + m_n g x_n + Q_2; \\
 & -m_n x_n \ddot{\varphi} + (m_0 + m_n) \ddot{z}_n + m_n \ddot{x}_n (\frac{\partial z_n}{\partial x_n} - \varphi) = \\
 & = -m_n \dot{x}_n^2 \frac{\partial^2 z_n}{\partial x_n^2} + 2m_n \dot{x}_n \dot{\varphi} + Q_3; \\
 & m_n (1 + \frac{\partial z_n}{\partial x_n} \varphi) \ddot{x} + m_n \ddot{\varphi} [(h_n + z_n) (1 + \frac{\partial z_n}{\partial x_n}) \varphi - \\
 & - x_n (\frac{\partial z_n}{\partial x_n} - \varphi)] + m_n (\frac{\partial z_n}{\partial x_n} - \varphi) \ddot{z}_n + m_n [(1 + \frac{\partial z_n}{\partial x_n} \varphi)^2 -
 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left[- \left(\frac{\partial z_n}{\partial x_n} - \varphi \right)^2 \right] \ddot{x}_n = -m_n \left(2\dot{\varphi} \dot{x}_n + \frac{\partial^2 z_n}{\partial x_n^2} \dot{x}_n^2 \varphi \right) \times$$

$$\times \left(1 + \frac{\partial z_n}{\partial x_n} \varphi \right) - m_n \left(\frac{\partial^2 z_n}{\partial x_n^2} \dot{x}_n^2 - 2\dot{x}\dot{\varphi} \right) \left(\frac{\partial z_n}{\partial x_n} - \varphi \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} m_n g \varphi^2 \frac{\partial z_n}{\partial x_n} - m_n g \varphi - m_n g \frac{\partial z_n}{\partial x_n},$$

где x, φ, z - продольное, угловое и вертикальное перемещения цистерны; J_0 - момент инерции твердого тела m_0 относительно поперечной оси; m_n - масса тележки; J_r - момент инерции колесных пар; n - число осей цистерны; r - радиус колеса; z_c - высота центра масс тела m_0 ; h_n - вертикальное смещение траектории $z_n = z_n(x_n)$; g - ускорение свободного падения. Слагаемые Q_1, Q_2 и Q_3 описывают силы, действующие на цистерну со стороны ее автосцепок и рессорного подвешивания, и могут включать или не включать составляющие сил вертикального взаимодействия автосцепок с конструкцией вагона. Указанное взаимодействие осуществляется системой сил, возникающих в местах закрепления хвостовика автосцепки и соприкосновения ее с центрирующим прибором как на исследуемом вагоне, так и на соударяющемся с ним (рис. 2). Силы $S'_{oi}, S''_{o,i-1}$ взаимодействия автосцепок i -го межвагонного соединения с центрирующими приборами моделируются путем введения упругих элементов жесткостью $K'_{oi}, K''_{o,i-1}$ и возникают при отклонении межвагонной связи от горизонтали на угол ψ_i , превышающий заранее определенные предельные углы ψ'_{oi} или $\psi''_{o,i-1}$. Величины $R'_{oi}, P'_{o,i-1}$ и $R''_{o,i-1}, P''_{oi}$ представляют собой реакции в точках закрепления автосцепок соответственно на i -ом и $(i-1)$ -ом экипажах, возникающие при появлении сил S'_{oi} и $S''_{o,i-1}$. На основе выполненного вспомогательного расчета показана возможность исключения из уравнений (I) слагаемых, содержащих производные от массы m_n .

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (I) решается путем численного интегрирования на ЭВМ. В процессе решения определяются наибольшие отклонения присоединенной массы m_n от ее невозмущенного положения $x_n = 0$, которые, в свою очередь, определяют значения ℓ_{max} отклонения свободной поверхности жидкого груза от невозмущенного состояния. При этом на каждом полупе-

ряде движения жидкости могут быть определены распределения наибольшего гидродинамического давлений по котлу цистерны с использованием регрессионной зависимости от следующих параметров: ℓ_{max} , безразмерного уровня заполнения котла $H' = H/R$ и силы S_i продольного удара в автосцепку цистерны.

Выполнено сопоставление результатов, полученных с помощью разработанной модели и линейной, основанной на маятниковой аналогии. Показано, что при малых силах соударения цистерны с вагоном-бойком результаты расчетов по линейной и нелинейной моделям достаточно близки между собой. В случае более интенсивных соударений наблюдаются существенные отличия в движении масс, моделирующих колебания жидкости, и, следовательно, отличия в характере движения самой цистерны после соударения. При этом максимальные значения продольной силы в автосцепке, вертикальных сил в рессорном подвешивании и прогибов рессор, найденные обоими способами, практически совпадают.

Предложенные математические модели колебаний цистерны и работы межвагонного соединения описаны на алгоритмическом языке фортран, и полученные блоки включены в вычислительную программу исследования с помощью ЭВМ динамики и нагруженности железнодорожных цистерн при соударениях и переходных режимах движения поездов. Разработанная программа позволяет сформировать расчетную схему исследуемого состава, включающего как цистерны, частично заполненные жидким грузом, так и полувагоны; выбрать режим движения поезда или сцепа вагонов. Программа включает набор базовых элементов, каждый из которых моделирует один железнодорожный экипаж, описанный с помощью известных ранее или разработанной выше расчетных схем.

В третьей главе выполнены исследования процесса соударения четырехосной цистерны с вагоном-бойком.

Показано, что разработанная математическая модель позволяет получить наблюдаемые в натурном эксперименте различия в прогибах рессорных комплектов цистерн. Как следует из рис. 3, максимальные значения прогибов Δ_1 на нагружаемом конце цистерны примерно вдвое ниже, чем прогибы Δ_2 на свободном. При расчете предполагалось, что жесткости взаимодействия k'_{oi} , k''_{oi} автосцепок с конструкцией вагона составляют 500 МН/м. Если вертикальное взаимодействие автосцепок с центрирующими приборами отсутствует ($k'_{oi} = k''_{oi} = 0$), то прогибы рессор становятся симметричными. Как показывают выполненные исследования, уменьшение расстояний d'_{oi} и d''_{oi} (рис. 2) в

процессе удара, связанное с наличием хода поглощающего аппарата, не оказывает существенного влияния на результаты расчетов.

С помощью разработанной нелинейной математической модели исследована нагруженность котла железнодорожной цистерны модели 15-1547, заполненной жидкостью с удельным весом $\gamma = 0,5 \text{ Р}$, при соударениях с вагоном-бойком. Рассмотрена ситуация, когда жидкость в цистерне в момент удара отклонена от своего невозмущенного состояния. Выбрены характерные положения свободной поверхности жидкого груза: максимальные отклонения от невозмущенного состояния и положение, близкое к невозмущенному. Начальные условия, описывающие состояние подвижной массы

m_n разработанной математической модели нелинейных колебаний жидкого груза, которые соответствуют выбранным положениям жидкости в момент удара, определены из предварительного расчета при силах удара в автоцепку цистерны $S = 2,2 \text{ МН}$ (интенсивные колебания жидкости) и $S = 0,5 \text{ МН}$ (слабые колебания). Скорость некачественного вагона-бойка изменяется в диапазоне от 0,7 м/с до 3,1 м/с, что соответствует силе удара в автоцепку покоящегося цистерны с неподвижной жидкостью 0,5 - 2,2 МН.

Показано, что при одинаковых скоростях некачественного вагона-бойка могут наблюдаться значительные разбросы значений продольной силы в автоцепке, наибольшего гидродинамического давления и перемещения свободной поверхности жидкости в зависимости от состояния жидкого груза в момент удара. Различия продольных сил при этом обусловлены наличием начальной скорости самой цистерны, причем эта скорость связана с состоянием транспортируемой жидкости. Наибольшие давления в котле цистерны наблюдаются в том случае, когда жидкость движется в сторону нагружаемого днища и конфигурация ее свободной поверхности близка к невозмущенной. Максимально нагруженным котел оказывается в случае, когда конфигурация свободной поверхности аналогична, а движение жидкого груза происходит в противоположном направлении.

Рассмотрены процессы соударения вагона-бойка с цистерной, имеющей подпор, в качестве которого выступает 1000-тонный сцеп. Расстояние L от цистерны до сцеп выбирается таким образом, чтобы удар в сцеп происходил при различных фазах движения жидкости. Показано, что состояние жидкого груза при ударе в сцеп оказывает существенное влияние на последующие колебания системы, а также на уровень возникающего гидродинамического давления. Полученный результат использован для обоснования разработанной методики экспериментальной отработки конструкций цистерн, внедренной концерном "Азотмаш".

Четвертая глава посвящена исследованию динамики наливного поезда, состоящего из локомотива и 24 цистерн, при пуске его в ход с места и после осаживания.

Анализ результатов, полученных с использованием различных расчетных схем цистерн, показал, что при пуске в ход с места предварительно растянутого наливного поезда выбор математической модели практически не влияет на распределения наибольших продольных сил. Если же поезд предварительно сжат, то учет взаимодействия жидкого груза и верхней части котла изменяет характер распределения наибольших продольных сил в наливном поезде по сравнению с полученным по линейным моделям. Наибольшие силы наблюдаются не в середине состава, а в хвосте, что более соответствует распределению сил в сухогрузном поезде. Однако уровень максимальных продольных сил в наливном поезде остается на 25-30% ниже, чем в равном по массе и длине сухогрузном составе. Полученная закономерность объясняется увеличением жесткости системы, связанным с ростом частоты колебаний жидкого груза при учете его взаимодействия с верхней частью котла цистерны.

Исследована зависимость динамических процессов, протекающих в поезде при переходных режимах движения, от начального состояния транспортируемой в цистернах жидкости на примере пуска в ход наливного поезда после его предварительного осаживания. Показано, что для исследуемого режима движения могут возникнуть ситуации, когда продольная нагруженность наливного состава становится выше, чем соответствующего сухогрузного (рис. 4). В зависимости от длительности осаживающего воздействия максимальные растягивающие силы в наливном поезде могут на 18-36% превосходить наибольшие силы в соответствующем сухогрузном составе. Установлено, что полученные максимумы продольных сил не могут быть обусловлены лишь случайным распределением зазоров в упряжи, а связаны с колебаниями жидкого груза. Наибольшие продольные силы возникают в том случае, когда действующая на цистерну сила в автосцепке меняет направление движения жидкости. Это соответствует результатам, полученным при одиночных соударениях цистерн.

Изучено влияние на нагруженность наливного состава длительности осаживающего воздействия локомотива и паузы t_n между окончанием осаживания и приложением силы тяги. Получено, что уровень возникающих при трогании после осаживания наибольших растягивающих сил в наливном поезде изменяется в зависимости от величины t_n по закону, близкому к синусоидальному, с периодом, равным периоду коле-

баний жидкого груза. При значениях паузы t_n , превышающих 2-3 периода колебаний жидкости в котлах цистерн, продольная нагруженность наливного поезда существенно понижается, и характер распределения наибольших сил по длине поезда приближается к полученному с помощью линейной модели. Описанные закономерности наблюдаются при различной продолжительности действия осаживающей силы на состав.

Установлено, что при исследуемых режимах движения наливного поезда гидродинамическое давление в котлах цистерны, а также продольные силы в автосцепках не превышают допустимые. При этом показано, что в результате колебаний жидкого груза в котлах возникают значительные вертикальные перемещения рессорных комплектов, которые могут приводить к обезгруживанию цистерн. Снижение уровня вертикальных сил, возникающих в рессорных подвешиваниях цистерн в поезде, достигается путем увеличения времени между окончанием осаживания и началом движения поезда под действием силы тяги локомотива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных в диссертации исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель нелинейных колебаний жидкости в котле железнодорожной цистерны, учитывающая возможность взаимодействия жидкого груза с верхней частью котла, и определены границы применимости этой модели к решению задач исследования нагруженности цистерн при продольных ударах.

2. Построен алгоритм определения гидродинамических параметров предложенной математической модели.

3. Уточнена математическая модель работы межвагонного соединения при соударениях путем учета сил вертикального взаимодействия автосцепок с центрирующими приборами.

4. Создано программное обеспечение, позволяющее исследовать динамику и нагруженность цистерн с учетом нелинейных колебаний жидкого груза при соударениях и движении в составе поезда.

5. Показано, что на формирование нагрузок, действующих при продольном ударе на цистерну с заданным уровнем заполнения котла жидким грузом, существенное влияние оказывает характер колебаний жидкости к моменту удара. Так, при ударах вагоном-бойком в цистерну, заполненную водой с недоливом $H = 0,5 R$, наибольшее давление в котле наблюдается в случае, когда жидкость движется в сторону вагона-бойка

и имеет конфигурацию свободной поверхности, близкую к невозмущенной. Получаемое при этом давление может в 1,5- 2,5 раза превышать соответствующие нагрузки, возникающие при той же скорости соударения с вагоном-бойком цистерны, жидкость в которой неподвижна в момент удара. При движении жидкости в сторону свободного конца цистерны и конфигурации свободной поверхности, близкой к невозмущенной, гидродинамическая нагруженность цистерны является наименьшей, уровень возникающих давлений может быть на порядок ниже, чем при ударе в цистерну с неподвижной жидкостью.

6. На основе выполненных исследований предложена методика экспериментальной отработки опытных образцов вагонов-цистерн при продольных ударах с учетом характера колебаний жидкого груза.

7. Показано, что вследствие возбуждения колебаний транспортируемой жидкости при пуске в ход после осаживания наливного поезда в его межвагонных соединениях могут возникать продольные силы, которые на 18-36 % выше, чем силы, возникающие при том же режиме движения аналогичного сухогрузного поезда. При этом наблюдаются значительные прогибы рессорных комплектов цистерн, которые могут привести к обезгруживанию вагонов.

8. Установлено, что снижение уровня продольной и вертикальной нагруженности цистерн, движущихся в составе наливного поезда, может достигаться увеличением промежутка времени между приложением к поезду возмущающих воздействий (осаживающей силы и силы тяги) до 10-15 с, что соответствует 2-3 периодам колебаний жидкого груза в котлах цистерн.

9. Результаты работы и созданное в процессе ее выполнения математическое и программное обеспечение внедрены в МНИПКТИ концерна "Азовмаш" (г. Мариуполь), Конструкторском бюро специального машиностроения (г. Санкт-Петербург) и переданы в отраслевой фонд алгоритмов и программ. Внедрение результатов работы подтверждается соответствующими документами.

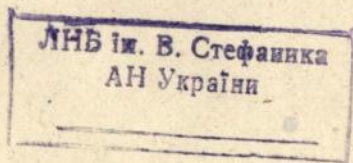
Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Блохин Е.П., Богомаз Г.И., Черномашенцева Ю.Г. К вопросу о взаимодействии экипажей при соударении // Динамика, прочность и надежность железнодорожного подвижного состава: Межвуз. сб. науч. тр. - Днепропетровск: ДНУ, 1987. - С. 71-82
2. Блохин Е.П., Богомаз Г.И., Черномашенцева Ю.Г. Формирование с помощью ЭВМ математической модели железнодорожного поезда с учетом плоских колебаний экипажей // Вопросы исследования динамики и надежности элементов подвижного состава и транспортных

машин. -Брянск: БИТМ, 1988. -С. 36-47

3. Богомаз Г.И., Черномашенцева Ю.Г. Математическое моделирование процессов соударения вагонов с учетом характера транспортируемых грузов // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава / Тезисы докладов Всесоюзной конференции. - Днепропетровск, 1988. - С 8
4. Богомаз Г.И., Луковский И.А., Черномашенцева Ю.Г. Нелинейные колебания жидкости в железнодорожной цистерне при продольных ударах // Нелинейные колебания механических систем / Тезисы докладов II Всесоюзной конференции. - Горький, 1990. - Т.2. - С.66.
5. Богомаз Г.И., Криволязук Ю.П., Черномашенцева Ю.Г. Исследование нагруженности вагонов с твердыми и жидкими грузами при переходных режимах движения поездов. - Днепропетровск, 1990.- 37 с.- (Препринт / АН Украины. Ин-т технической механики; 90-10).
6. Богомаз Г.И., Луковский И.А., Черномашенцева Ю.Г. Исследование нелинейных колебаний жидкости в котлах железнодорожных цистерн при ударах в автосцепку // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Динамика, прочность и надежность подвижного состава/ Тезисы докладов УГ конференции. - Днепропетровск, 1992.- С. 7-8
7. Богомаз Г.И., Мехов Д.Д., Пилипченко О.П., Черномашенцева Ю.Г. Нагруженность контейнеро- цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку // Динамика и управление движением механических систем. - Киев: Наук. думка, 1992. - С. 87- 95

Богомаз



ЧЕРНОШАПЕНЦЕВА Елия Генриховна

Прогнозирование нагруженности железнодорожных
цистерн при продольных ударах с учетом нелинейных
колебаний жидкого груза

Об.22.07 - Подвижной состав железных дорог и
тяга поездов

Подписано к печати 25.05.93

Формат 60x90 1/16. Бумага для множительных
аппаратов. Усл. печ.л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Зак. 624. Бесплатно

Участок оперативной полиграфии ДИИТа.
320700, ГСП, Днепропетровск, 10,
ул. Академика В.А.Лазаряна, 2.

Бесплатно

AB 27.635

AB 27.635