

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

КОРОТЕНКО Леонид Михайлович

УДК 629.463.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ БУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ
ЦИСТЕРНЫ С УЧЕТОМ ПОДВИЖНОСТИ ЖИДКОГО ГРУЗА

05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и
тяга поездов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск 1989

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В принятых на XXУП съезде КПСС основных направлений экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года предусмотрено дальнейшее повышение эффективности работы железнодорожного транспорта. В решении этой задачи определенная роль принадлежит подвижному составу, его техническому уровню и качеству, надежной работе в эксплуатации. В связи с этим железнодорожный транспорт должен постоянно пополняться новыми более надежными вагонами повышенной грузоподъемности и вместимости обеспечивающими увеличение провозной способности железных дорог. Основными направлениями развития вагоностроения в частности предусматривается создание нового поколения грузовых вагонов с повышенной нагрузкой до 25-26 тс с увеличенной грузоподъемностью и вместимостью, сниженной на 5-12 % удельной их материалоемкостью.

Одним из типов специализированных вагонов, парк которых постоянно обновляется, являются вагоны-цистерны. Их динамика в значительной степени зависит от поведения перевозимого груза. Жидкости принципиально не могут быть закреплены при перевозке, а наличие свободной поверхности создает условия для их колебаний, что оказывает неблагоприятное воздействие на безопасность движения и нагруженность элементов конструкции железнодорожных цистерн. В связи с этим большое значение имеет исследование методами математического моделирования динамики цистерн с учетом колебаний жидкости при движении по неровностям пути.

Решение вопросов создания новой техники невозможно без массового внедрения математического моделирования и вычислительного эксперимента в проектно-конструкторские работы. Комплексная программа научно-технического прогресса стран - членов СЭВ до 2000 года предусматривает выполнение программы электрификации народного хозяйства, предусматривающей сокращение сроков проектирования новых изделий в 2 ... 4 раза, повышение производительности труда научных и инженерно-технических работников, сокращение затрат на получение и обработку научных данных, ускорение внедрения научных результатов в народное

хозяйство.

В этих условиях, как отмечает академик А.А.Самарский, важны все звенья триады модель-алгоритм-программа, которые должны получать равное развитие и выполняться на одинаково высоком уровне. В связи с этим задачу моделирования боковых колебаний железнодорожных цистерн с учетом подвижности жидкого груза целесообразно решать комплексно, разрабатывая расчетную схему, создавая математическую модель и эффективные алгоритмы для её программной реализации с использованием передовых технологий программирования.

Целью работы является:

- разработка математической модели для исследования боковых колебаний четырехосной железнодорожной цистерны с учетом подвижности жидкого груза при её влинии, боковом оттоке и боковой качке;

- создание эффективных алгоритмов и программного обеспечения для определения гидродинамических параметров механической системы - аналога котла цистерны с жидким грузом;

- разработка специализированных алгоритмов и их реализация с применением технологии структурного программирования и методов машинной графики для визуализации результатов решения задач динамики и устойчивости движения железнодорожных цистерн;

- исследование устойчивости движения (в том числе частот и форм колебаний) вагонов-цистерн с учетом подвижности жидкого груза при частичном их заполнении в зависимости от уровня недолива;

- проведение теоретических и экспериментальных исследований динамических характеристик четырехосных железнодорожных цистерн с целью обоснования и уточнения математической модели;

- разработка методики, вычисление коэффициентов для определения эквивалентной динамической нагруженности вагонов-цистерн при боковых колебаниях в случае замены при ходовых испытаниях реального груза водой.

Методы исследования. В работе использованы методы математического моделирования колебаний механических систем, динамики твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью, позволяющие перейти от линеаризованной системы котел-

жидкость с распределёнными параметрами к дискретной механической системе с конечным числом степеней свободы. Решение краевых задач для составляющих потенциала смещений частиц жидкости при определении параметров механических аналогов котла цистерны с жидким грузом производилось вариационным методом Рунге с использованием гармонических полиномов. Исследование устойчивости движения вагона-цистерны проводилось с комплексным использованием QR -алгоритма, метода обратных итераций и контролем точности вычислений. При исследовании вынужденных колебаний цистерны использовались методы численного интегрирования нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Для визуализации результатов решения использовались методы машинной графики. Программное обеспечение создавалось с помощью методов структурного программирования. Результаты расчетов сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными в ходе натурных испытаний цистерн на скоростном полигоне ВНИИЖТ (ст. Белорецкая - ст. Майкоп Северо-Кавказской железной дороги).

Научная новизна

Разработана расчетная схема и создана математическая модель для исследования боковых колебаний четырехосной железнодорожной цистерны, частично заполненной жидким грузом, позволяющая учитывать колебания жидкости, возникающие при влинии, боковом отношении и боковой качке котла.

Для исследования устойчивости движения и вынужденных боковых колебаний вагона-цистерны с применением технологии структурного программирования разработано программное обеспечение, включающее: комплекс программ для решения полной проблемы собственных значений с высокой точностью; комплекс программ для эффективного использования внешних магнитных накопителей ЭВМ БЭСМ-6 и комплекс структурированных технологических модулей для обеспечения графического интерфейса пользователя, повышающие степень автоматизации решения задач динамики подвижного состава; программу численного интегрирования нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, созданную согласно сформулированным требованиям к проблемно-ориентированным программам и опирающуюся на двухуровневую библиотеку прикладных программ.

С использованием созданного программного обеспечения проведены исследования устойчивости движения и вынужденных колебаний вагона-цистерны при различных уровнях недолива. На основе обобщения экспериментальных и теоретических данных разработана методика и вычислены коэффициенты для определения эквивалентной динамической нагруженности вагонов-цистерн при боковых колебаниях в случае замены при ходовых испытаниях реального груза водой.

Практическая ценность работы. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение, созданное для ЭВМ БЭСМ-6, для исследования колебаний четырехосных железнодорожных цистерн с учетом колебаний жидкого груза, возникающих при вилянии, боковом оттоке и боковой качке котла, могут быть использованы на этапе проектирования новых образцов цистерн либо при замене части натурных испытаний вычислительным экспериментом, а также при отработке новых образцов цистерн в ходе натурных динамических испытаний при замене экологически опасных жидкостей безопасными. Использование предложенной методики определения эквивалентной динамической нагруженности позволяет с достаточной для практических задач точностью оценивать динамические нагрузки, возникающие в различных элементах конструкции цистерны при замене реальных грузов водой, оценивать устойчивость их движения при вариациях различных параметров, внедрять в практику исследований средства машинной графики. Использование технологии структурного программирования обеспечивает легкость освоения, модификации и сопровождения созданного программного обеспечения.

Внедрение результатов работы. Разработанная методика определения эквивалентной нагруженности вагонов-цистерн для перевозки аммиака (модель И5-И6И9) и хлора (модель И5-И620) при замене реального груза водой при ходовых испытаниях внедрена НИПКИ ПО "Азовмаш" при выполнении работ по выбору конструктивных параметров, проведении испытаний и отработке конструкций опытных образцов цистерн. Использование разработанной методики позволило на стадии проектирования произвести уточненную оценку нагруженности и прочности отдельных несущих узлов указанных цистерн, ускорить проведение испытаний и отработку опытного образца цистерны модели И5-И6И9 для запуска их в се-

рийное производство. Экономический эффект от внедрения подтверждается соответствующими документами. Разработанные методические рекомендации по использованию технологии структурного программирования и комплекс программ для исследования устойчивости движения сложных механических систем переданы и используются в ДИИТе. В двухуровневой библиотеке прикладных программ института накоплены эффективные программные средства для обеспечения вычислительного эксперимента в области динамики сложных механических систем, в том числе и с полостями, частично заполненными жидким грузом.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались:

- на Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (г. Днепропетровск, 1984, 1988 гг.);
- на Республиканской научно-технической конференции "Пути повышения эффективности научного, инженерного и управленческого труда в условиях интенсификации производства" (г. Днепропетровск, 1986 г.);
- на научно-технической конференции "Современные технологии программирования" (г. Днепропетровск, 1987 г.);
- на Всесоюзном совещании "Перспективы развития и опыт эксплуатации высокопроизводительных вычислительных комплексов" (г. Днепропетровск, 1988 г.);
- на Всесоюзной конференции "Перспективы развития вагоностроения" (г. Москва, 1988 г.);
- на Всесоюзной конференции "Методы и средства обработки сложной графической информации" (г. Горький, 1988 г.);
- на семинаре "Динамика и прочность вагонов" кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство" МИИТа (г. Москва, 1988 г.);
- на научных семинарах отделов Института технической механики АН УССР (1981 - 1989 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 102 с. машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (211 наименований), приложений, рисунков и таблиц в тексте диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работ по совершенствованию методов исследования динамики железнодорожных цистерн, изучению их динамических качеств в целях создания новых более надежных вагонов-цистерн повышенной грузоподъемности и вместимости, улучшения их конструкций при одновременном обеспечении удовлетворительных динамических характеристик в диапазоне эксплуатационных скоростей. При этом подчеркивается, что решение вопросов создания новой техники невозможно без массового внедрения математического моделирования и вычислительного эксперимента в проектно-конструкторские работы. Сформулированы цели исследования и основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе проводится обзор литературы, содержится анализ современного состояния и направлений развития как у нас в стране, так и за рубежом основных предметных областей, привлекаемых для решения поставленной задачи: динамики подвижного состава, динамики ограниченного объема жидкости и информационной технологии.

Исследования динамики подвижного состава основываются на фундаментальных исследованиях отечественных и зарубежных ученых. Большой вклад в создание теории подвижного состава внесли отечественные ученые М.Ф.Вериго, С.В. Вершинский, М.В. Винокуров, А.М. Годыцкий-Цвирко, В.Н. Данилов, Н.А. Ковалев, С.М. Куценко, В.А. Лазарян, В.Б.Медель, И.И. Челноков и многие другие, а также зарубежные ученые В.Боммель, А.Гилхрист, К.Йокосе, Д. Калкер, Ф.Картер, Н.Куперрайдер, Э.Лоу, Т.Мацудайра, А. де Патер, И. Рокар, Г. Савадж, А. Уиккенс и многие другие.

Ускоренному развитию новых методов исследований динамики средства рельсового транспорта способствовали труды Е.П. Блохина, Л.С. Грачевой, В.Д.Дановича, Ю.В.Демина, О.П.Ершкова, А.А.Камаева, В.А.Камаева, А.Я.Когана, М.Л.Корстенко, Н.Н.Кудрявцева, А.А.Львова, Л.А.Манашкина, С.Ф.Редько, Ю.С.Ромена, А.Н.Савоськина, М.М.Соколова, Т.А.Тибилова, В.Ф.Ушкалова, А.А.Хохлова, В.Д.Хусидова и других известных ученых.

Наличие свободной поверхности жидкого груза в котле вагона-цистерны значительно усложняет задачу исследования её дина-

мики из-за взаимодействия колебаний котла и перевозимой в нем жидкости. Разработке и совершенствованию методов исследования динамики железнодорожных цистерн, изучению их прочностных и динамических качеств посвящены работы Е.П.Блохина, Ю.П.Бороненко, Г.И.Богомаза, А.А.Долматова, М.Б.Кельриха, Н.Н.Кудрявцева, В.И.Котуранова, В.А.Лазаряна, А.А.Львова, Л.А.Манашкина, А.В.Рыжова, М.М.Соколова, Д.М.Черкашина и ряда других известных ученых.

Для исследования боковых колебаний железнодорожных цистерн Ю.М.Черкашиным была предложена модель, учитывающая колебания жидкого груза, связанные с боковым относом и боковой качкой котла, инерционные характеристики которого определялись по формулам Н.Е.Жуковского. А.А.Львов для определения инерционных характеристик котла использовал результаты работ Б.Будянского и Д.Е.Охоцимского. В работах М.М.Соколова и Ю.П.Бороненко предлагалась сложная нелинейная модель, учитывающая взаимодействие колебаний жидкого груза с колебаниями котла в вертикальной продольной и горизонтальной плоскостях с учетом резонансных колебаний жидкости. Анализ указанных работ позволяет сделать вывод о целесообразности выбора направления исследований, при котором кроме бокового относа и боковой качки котла цистерны учитывается также и его влияние, а инерционные характеристики котла при частичном заполнении его жидкостью вычисляются по уточненной методике с использованием линеаризованной модели системы тело-жидкость.

Развитию методов, позволяющих перейти от континуальной линеаризованной системы котел-жидкость к дискретной механической системе, посвящены работы отечественных и зарубежных ученых Х.Абрамсона, И.Б.Богоряде, Б.Будянского, Н.Е.Жуковского, И.А.Луковского, Г.Н.Микишева, Н.Н.Моисеева, Г.С.Нариманова, М.В.Остроградского, Д.Е.Охоцимского, Б.И.Рабиновича, И.М.Рапопорта и др. Наибольшее распространение при решении задач гидродинамики получил вариационный метод Ритца. Большая работа по развитию этого метода проводилась в Институте математики АН УССР под руководством И.А.Луковского. Методика определения параметров механических аналогов котлов железнодорожных цистерн, частично заполненных жидким грузом, развивалась совместно Институтом математики и Институтом механики АН УССР и позво-

ляет с достаточной степенью точности определять динамические параметры системы тело-жидкость для горизонтально расположенных цилиндрических баков, частично заполненных жидким грузом.

Сложность решаемой задачи требует серьезного отношения к программной реализации алгоритма её решения на ЭВМ в целях накопления научных знаний в виде отлаженного и работающего программного обеспечения для исследования устойчивости движения и вынужденных боковых колебаний вагона-цистерны, доступного широкому кругу пользователей. Большой вклад в совершенствование технологии обработки данных внесли советские и зарубежные ученые К.Бом, И.В.Вельбицкий, Дж. Гэннон, Э.Дейкстра, Г. Джакопини, А.П.Ершов, И.Зелковиц, Э.Йодан, В.В.Дипаев, Г.Майерс, Дж. Фокс, А.Шоу и многие другие.

Для создания надежных, легко сопровождаемых программных изделий, придания процессу создания программного обеспечения промышленного характера необходимо применение современных технологий программирования. К крупнейшим достижениям в этой области относится структурное программирование, которое явилось одним из краеугольных камней в основании науки программирования. Таким образом, перспективным подходом при решении поставленной задачи является сочетание методов математического моделирования с современной информационной технологией и данными натурных экспериментов, что позволяет получить модель, адекватно отражающую реальное поведение объекта исследования, и обеспечить проведение вычислительного эксперимента.

Вторая глава посвящена разработке расчетной схемы и созданию математической модели для исследования боковых колебаний четырехосной железнодорожной цистерны на тележках модели ИВ.100, котел которой частично заполнен жидким грузом, а также разработке методики учета подвижности жидкого груза.

Расчетная схема указанной четырехосной цистерны представлена в виде системы одиннадцати твердых тел (четыре колесных пары; четыре боковины; две надрессорных балки; эквивалентное твердое тело, заменяющее котел и ту часть жидкости, которая участвует в колебаниях вместе с ним) и двух наборов маятников, имитирующих колебания жидкости соответственно при влинии и боковом отношении с боковой качкой котла. Число маятников для каждого набора соответствует числу учитываемых тонов колебаний.

При выборе расчетной схемы приняты во внимание: нелинейности профиля поверхности катания колеса, сил псевдоскольжения и сил сухого трения в элементах соединения ходовых частей и пятниковых узлах, случайные возмущения, действующие на ходовые части в горизонтальной плоскости.

Обобщенные координаты выбраны следующим образом:

$$\begin{aligned} q_1 &= y, \quad q_2 = y_{16}, \quad q_3 = y_{36}, \quad q_4 = \theta, \\ q_5 &= \theta_{1n}, \quad q_6 = \psi, \quad q_7 = \psi_{1n}, \quad q_8 = \psi_{2n} \\ q_9 &= \psi_{16}, \quad q_{10} = \psi_{36}, \quad q_{11} = \theta_{2n}, \quad q_{12} = z, \\ q_{13} &= \varphi, \quad q_{14} = \chi, \quad q_{14+n} = q_n \quad (n = \overline{1, n^t}), \\ q_{n_1+n} &= \alpha_n \quad (n = \overline{1, n^t}), \quad n_1 = 14 + n^t \end{aligned} \quad (I)$$

где χ, y, z — перемещения, а θ, φ, ψ — углы поворотов относительно соответствующих осей Ox, Oy, Oz эквивалентного твердого тела; q_n, α_n — углы отклонения n -тых маятников, моделирующих колебаний жидкости, возникающие соответственно при влиянии и боковом отnose с боковой качкой котла; n^t, n^t — число тонов колебаний, учитываемых с помощью соответствующих маятников. В уравнениях (I) координаты с индексами $1n$ и $2n$ характеризуют перемещения наддрессорных балок, 16 и 36 — левых по ходу движения боковин соответственно первой и второй тележек.

Возмущенное движение котла цистерны с жидким грузом при его боковой качке и боковом отnose описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} (m_o^t + \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t) \ddot{y} + (m_o^t z_c^t + \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t c_n^t) \ddot{\theta} - \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t l_n^t \ddot{\alpha}_n &= P_y, \\ (J_o^t + \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t c_n^t) \ddot{\theta} + (m_o^t z_c^t + \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t c_n^t) \ddot{y} - \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t c_n^t l_n^t \ddot{\alpha}_n - \\ - g(m_o^t z_c^t + \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t c_n^t) \theta &= M_{\theta x}, \\ J_n^t \ddot{\alpha}_n + g m_n^t l_n^t \alpha_n - m_n^t l_n^t \ddot{y} - m_n^t c_n^t l_n^t \ddot{\theta} &= 0 \quad (n = \overline{1, n^t}), \end{aligned} \quad (2)$$

где m_o^t, J_o^t — соответственно масса и момент инерции эквивалентного твердого тела; z_c^t — расстояние от начала координат

до центра масс C эквивалентного твердого тела; $m_n^t, \mathcal{I}_n^t, c_n^t, \ell_n^t$ — соответственно масса, момент инерции относительно оси подвеса, расстояние от начала координат до оси подвеса и длина подвеса n -го маятника; g — ускорение свободного падения; P_y, M_{on} — обобщенные силы, соответствующие координатам y и θ .

В свою очередь параметры маятников и эквивалентного твердого тела, определяются с помощью выражений:

$$\begin{aligned} m_n^t &= \frac{\lambda_n^2}{\mu_n}, & m_{on}^t &= \frac{\lambda_{on}^2}{\mu_n} = m_n^t c_n^{t^2} = \mathcal{I}_n^t \\ c_n^t &= \frac{\lambda_{on}}{\lambda_n}, & m_o^t &= m^o + m - \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t \\ \ell_n^t &= \frac{g}{\omega_n^2}, & \mathcal{I}_o^t &= \mathcal{I}_x^o + \mathcal{I}_x - \sum_{n=1}^{n^t} m_n^t c_n^{t^2} \\ z_c^t &= \frac{z_o(m^o + m) + \sum_{n=1}^{n^t} \frac{\lambda_n \lambda_{on}}{\mu_n}}{m^o + m - \sum_{n=1}^{n^t} \frac{\lambda_n}{\mu_n}} \\ z_o &= z_o' + \frac{\Omega}{m^o + m}, & \Omega &= \rho_{\mathcal{J}} \mathcal{I}_{x_o} \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_n — собственная частота n -го тона колебаний жидкости в котле; m, m^o — соответственно масса жидкости и порожнего котла цистерны; $\mathcal{I}_x, \mathcal{I}_x^o$ — моменты инерции жидкости и котла относительно его продольной оси; z_o — координата метацентра системы тело-жидкость, аналогичного по своему механическому смыслу метацентру плавающего тела, известного из теории корабля; z_o' — координата центра масс системы тело-жидкость при затвердевшей в невозмущенном состоянии жидкости, $\rho_{\mathcal{J}}$ — плотность жидкости; $\mathcal{I}_{x_o}$ — экваториальный момент инерции площади свободной поверхности жидкости относительно её продольной оси; $\lambda_n, \lambda_{on}, \mu_n$ — величины, называемые присоединенными массами жидкости либо гидродинамическими коэффициентами.

Возмущенное движение котла цистерны с жидким грузом при его влиянии описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left(J_0^r + \sum_{n=1}^{\pi^r} J_n^r \right) \ddot{\psi} + \sum_{n=1}^{\pi^r} J_n^r \left(\frac{\ell_n^r}{c_n^r} \right) \ddot{\eta}_n = M_{0z} \quad (4)$$

$$J_n^r \left(\frac{\ell_n^r}{c_n^r} \right)^2 \ddot{\eta}_n + g J_n^r \frac{\ell_n^r}{c_n^{r2}} \eta_n + J_n^r \frac{\ell_n^r}{c_n^r} \ddot{\psi} = 0 \quad (n = \overline{1, \pi^r}),$$

где J_0^r, J_n^r - моменты инерции относительно вертикальных осей соответственно эквивалентного твердого тела и пары маятников массой m_n^r на бифилярном подвесе, соединенных невесомым стержнем; $2c_n^r$ - расстояние между точками подвеса бифилярного маятника, равное расстоянию между массами m_n^r ; ℓ_n^r - длина подвесов n -тых маятников; M_{0z} - обобщенный момент сил, соответствующих координате ψ

Параметры маятников и эквивалентного твердого тела определяются с помощью следующих выражений

$$J_n^r = \frac{\lambda_{zn}^2}{\mu_{zn}} \quad \ell_n^r = \frac{\omega_{zn} \mu_{zn}}{g \lambda_{zn}^2} \quad (5)$$

$$J_0^r = J_z^0 + J_z = \sum_{n=1}^{\pi^r} \frac{\lambda_{zn}^2}{\mu_{zn}},$$

где ω_{zn} - собственная частота n -го тона колебаний жидкости в котле; J_z, J_z^0 - моменты инерции жидкости и котла относительно вертикальной оси; λ_{zn}, μ_{zn} - величины, называемые присоединенными массами жидкости либо гидродинамическими коэффициентами.

Гидродинамические коэффициенты $\lambda_n, \lambda_{0n}, \mu_n, \lambda_{zn}, \mu_{zn}$ могут быть вычислены после отыскания функций φ_n и ψ , являющихся составляющими потенциала малых смещений частиц жидкости, из решения следующих краевых задач

$$\begin{cases} \Delta \varphi_n = 0 & \text{в } Q \\ \frac{\partial \varphi_n}{\partial \nu} = \alpha \varphi_n & \text{на } \Sigma; \\ \frac{\partial \varphi_n}{\partial \nu} = 0 & \text{на } S \end{cases} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{\psi} = 0 \text{ в } Q; \quad \bar{\psi} = \psi_1 \bar{i} + \psi_2 \bar{j} + \psi_3 \bar{k}; \\ \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \nu} = [R_0 \times \nu] \text{ на } \Sigma; \\ \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \nu} = [R \times \nu] \text{ на } S, \end{array} \right. \quad (7)$$

где R_0 - радиус-вектор от начала координат до центра тяжести площади свободной поверхности жидкости, затвердевшей в невозмущенном состоянии; R - радиус-вектор произвольной точки на поверхности S ; Q - объем, занимаемый жидкостью; S - смоченная поверхность котла; ν - орт внешней нормали к поверхности S ; Σ - свободная поверхность жидкости; Δ - оператор Лапласа; $\omega = \omega_n^2/g$

Решение краевых задач (6) и (7) проводилось с использованием вариационного метода Рунта по методике, разработанной в Институте математики АН УССР, для чего был создан комплекс программ на языке Алгол для ЭВМ БЭСМ-6. С помощью указанного комплекса получены параметры механических аналогов котла цистерны модели И5-1443, заполненного водой при различных уровнях заполнения.

В третьей главе с использованием созданной математической модели получены линеаризованные уравнения движения вагона-цистерны как автономной существенно неконсервативной системы. Обсуждаются вычислительные трудности, которые приводят к необходимости создания комплекса программ для исследования устойчивости движения вагона-цистерны. В него входят программы для решения полной проблемы собственных значений с помощью QR -алгоритма и нахождения собственных векторов методом обратных итераций, реализованные на языке Фортран с двойной точностью. Для контроля точности вычислений используется вычисление невязки уравнения $Aa = \lambda a$, как соотношение норм

$$\varepsilon_a = \frac{\|Aa - \lambda a\|}{\|a\|},$$

где a - вычисленный собственный вектор матрицы A , соответствующий собственному числу λ

В связи с небольшим объемом ОЗУ ЭВМ БЭСМ-6, а также для удобства использования машинной графики, создан комплекс программ для эффективного использования внешних магнитных накопителей ЭВМ БЭСМ-6. С использованием наиболее популярных в настоящее время графических систем Графор и СИГАМ создан графический интерфейс пользователя (ГИП) на базе структурированных технологических модулей для вывода графиков одного переменного на форматы А4 либо А3 по ГОСТ 2.319-81 на графопостроитель либо АЦПУ для непосредственного включения в научно-техническую документацию с учетом необходимости предварительного просмотра графических зависимостей на экране алфавитно-цифрового видеотерминала.

С помощью разработанного программного обеспечения проведены исследования устойчивости движения вагона-цистерны. Получены значения и проведен анализ критических скоростей, запаса устойчивости от уровня недолива и степени износа пятников. При неизношенных пятниках наибольшие значения критических скоростей получаются для полностью заполненной цистерны и недоливе 1,5 м, а наименьшие значения для порожней цистерны и недоливе 0,5 м. При изношенных пятниках наибольшая критическая скорость получена для полностью заполненной цистерны, более низкая критическая скорость получена для недолива 0,5 м и порожней цистерны, а минимальная при недоливе 1,5 м. Таким образом можно заключить, что износ пятников снижает значения критической скорости, а особенно для недолива 1,5 м. Наибольшим запасом устойчивости движения характеризуется полностью заполненная цистерна, а наименьшим — порожняя.

Анализ полученных частот и форм колебаний показал, что их спектры содержат частоты, существенно изменяющиеся со скоростью движения и мало зависящие от V . Изменение уровня заполнения цистерны оказывает существенное влияние на частотный состав спектров.

Четвертая глава посвящена разработке методики и вычислению коэффициентов для определения эквивалентной динамической нагруженности вагонов-цистерн при боковых колебаниях в случае замены реального груза водой при ходовых испытаниях.

На первом этапе определены требования к проблемно-ориентированным программам. Описан процесс создания программы чис-

ленного интегрирования нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений для исследования вынужденных колебаний вагонов-цистерн с учетом определенных требований и применением технологии структурного программирования, опирающуюся на двухуровневую библиотеку прикладных программ института, созданную с участием автора.

Проведено сопоставление результатов исследования вынужденных колебаний вагона-цистерны методами цифрового моделирования с опытными данными по максимальным значениям рамных сил $H_{рл}$, действующих на первую колесную пару. При этом расхождения результатов не превышают 25 %. Исследование влияния учета подвижности жидкого груза на нагруженность ходовых частей цистерны показало, что при недоливах $H \leq 0,3$ радиуса котла с приемлемой для практических результатов точностью в расчетах можно принимать жидкость "затвердевшей". При увеличении уровня недолива такое допущение приводит к завышенным результатам, поэтому при $H > 0,3$ радиуса котла необходимо принимать во внимание подвижность жидкости в котле цистерны.

Оценка различных вариантов моделей колебаний жидкого груза показала, что исключение из рассмотрения подвижности жидкости при извилистом движении котла цистерны приводит к расхождению результатов, полученных с использованием полной и "усеченной" таким образом моделей.

Разработана методика оценки эквивалентности нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн при замене экологически опасных жидких грузов с различной плотностью водой. Для жидкостей с плотностью меньшей, чем плотность воды за критерий сравнения выбрано равенство по грузоподъемности, в противном случае – равенство уровней недолива. С использованием разработанной математической модели производятся расчеты для конкретного типа цистерны, заполненного каждым из видов жидкого груза, в результате чего определяются максимальные значения интересующих исследователя динамических характеристик и статистических процессов их изменения. Отношения одноименных величин называются коэффициентами эквивалентности и служат для корректировки результатов ходовых испытаний.

Определены показатели эквивалентной нагруженности цистерн для перевозки аммиака (модель И5-И619) и хлора (модель И5-И620)

Например, при $v = 60$ км/ч для цистерны модели И5-И619 коэффициенты эквивалентности для пересчета значений максимальных значений ускорений первого пятника U_1 и рамных сил, действующих на первую колесную пару, H_{p1} равны соответственно:

$\kappa_1(U_1) = 0,66$; $\kappa_3(H_{p1}) = 0,62$. Для цистерны модели И5-И620 коэффициенты эквивалентности равны: $\kappa_1(U_1) = 1,02$;
 $\kappa_3(U_{p1}) = 1,12$ ($H = 0,7$ м, $t = 20$ °C); $\kappa_1(U_1) = 1,33$;
 $\kappa_3(U_{p1}) = 1,13$ ($H = 0,64$ м, $t = -34$ °C).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Составлена расчетная схема и построена математическая модель боковых колебаний четырехосной железнодорожной цистерны на тележках модели И6.100 с учетом подвижности жидкого груза при колебаниях виляния, бокового отхода и боковой качки котла. При этом учтены нелинейности профиля поверхности катания колеса, сил псевдоскольжения и сил сухого трения в элементах соединения ходовых частей и пятниковых узлах, случайные возмущения, действующие на ходовые части в горизонтальной плоскости.

2. Разработана методика учета подвижности жидкости при боковых колебаниях цистерны и программное обеспечение для определения параметров механических аналогов котла, частично заполненного жидким грузом.

3. Для исследования устойчивости движения и вынужденных боковых колебаний вагона-цистерны с применением технологии структурного программирования разработано программное обеспечение, включающее комплекс программ для решения полной проблемы собственных значений с высокой точностью; комплекс программ для эффективного использования внешних магнитных накопителей ЭВМ БЭСМ-6 и комплекс структурированных технологических модулей для обеспечения графического интерфейса пользователя, повышающие степень автоматизации решения задач динамики подвижного состава; программу численного интегрирования нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, созданную согласно сформулированным требованиям к проблемно-ориентированным программам и опирающуюся на двухуровневую библиотеку прикладных программ.

4. Результаты теоретических исследований вынужденных колебаний вагона-цистерны сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что с достаточной для практики точностью разработанная математическая модель может быть использована для исследования боковых колебаний четырехосных железнодорожных цистерн. При этом подвижность жидкого груза в котле следует принимать во внимание при уровне недолива большем $0,3$ радиуса котла, учитывая при этом три первых нечетных тона колебаний жидкости, возникающих при влинии котла, и два - для бокового отбоя и боковой качки котла.

5. Разработана методика оценки эквивалентной динамической нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн при их боковых колебаниях, позволяющая определять значения их динамических характеристик путем замены при ходовых испытаниях реальных грузов, в том числе экологически опасных, водой.

6. Получены коэффициенты эквивалентности для четырехосных железнодорожных цистерн для аммиака (модель И5-И6И9) и для хлора (модель И5-И620), позволяющие определять динамические характеристики указанных типов цистерн по результатам ходовых испытаний при заполнении их водой.

7. Методика оценки эквивалентной динамической нагруженности, а также результаты исследований динамической нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн для перевозки аммиака и хлора внедрена в НИПКИ ПО "Азовмаш" при выполнении работ по выбору конструктивных параметров, проведении ходовых испытаний и отработке конструкций опытных образцов цистерн.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Быстродействующая программа построения графиков перпендикулярно направлению протяжки бумажной ленты АЦПУ. Киев, 1979. - 32 с. - Деп. в УкрФАП 29.06.79, № 5205.
2. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Программа гибкого распределения внешней памяти на МЛ при работе в мультипрограммном режиме // Тр. ин-та / Ин-т кибернетики АН УССР. 1980. Вып. 10. С. 161-162.

3. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Комплекс сервисных программ для организации бесформатного обмена с внешней памятью на МЛ и МД. // Тр. Ин-та / Ин-т кибернетики АН УССР. 1980. Вып. 10. С. 183-185.
4. Математическое моделирование пространственных колебаний восьмиосной железнодорожной цистерны, транспортирующей жидкие грузы / Г.И.Богомаз, Ю.В.Демин, А.Н.Комаренко, Л.М.Коротенко. - М., 1983. - 39 с. - Деп. в ВИНТИ 23.09.83, № 4995/83.
5. Вычисление параметров механических аналогов котла железнодорожной цистерны с жидкостью при его поперечных колебаниях / Г.И.Богомаз, А.Н.Комаренко, Л.М.Коротенко, Б.З.Суслович // Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава. - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. трансп. 1983. С. 78-84.
6. Богомаз Г.И., Коротенко Л.М. Пространственные колебания восьмиосной цистерны // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез. докл. Всесоюзн. науч. конф. 23-26 мая 1984. - Днепропетровск, 1984. С. 58-59.
7. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М., Коротенко Н.М. Комплекс программ для эффективного использования лент и дисков на ЭВМ БЭСМ-6. Киев, 1985. - 75 с. - Деп. в УкрДАП 03.04.85, № АП0020.
8. О боковых колебаниях восьмиосных экипажей / Ю.Н.Базилевич, Ю.В.Демин, М.Б.Кальрих, Л.М.Коротенко // Конструкторско-технологические исследования в области создания металлургического, горнорудного, подъемно-транспортного оборудования и цистерностроения. - Краматорск: НИИПТмаш, 1985. С. 90-100.
9. Базилевич Ю.Н., Демин Ю.В., Коротенко Л.М. Распределение амплитуд колебаний многомассовой существенно неконсервативной системы // Колебания и прочность механических систем. - Киев: Наук. думка, 1986. С. 81-87.
10. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Повышение эффективности и качества программного обеспечения на этапе перехода и технологии пакетов прикладных программ // Пути повышения эффективности научного, инженерного и управленческого труда в условиях интенсификации производства: Тез. докл. Республ. науч. конф. 13-14 нояб. 1986. - Днепропетровск, 1986. Вып. 2. С. 13-14.

11. Богомаз Г.М., Коротенко Л.М., Кривовязюк Ю.П. Пространственные колебания четырехосной цистерны с жидким грузом // Нагруженность и надежность механических систем. - Киев: Наук. думка, 1967. С. 60-66.
12. Коротенко Л.М. Математическое моделирование боковых колебаний железнодорожных цистерн // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. 25-27 мая 1988. - Днепропетровск, 1988. С. 114.
13. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Комплекс структурированных технологических модулей для вывода графической информации как средство обучения приемам и методам организации графического интерфейса в задачах динамики подвижного состава // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. 25-27 мая 1988. - Днепропетровск, 1988. С. 57.
14. Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Организация трехуровневого программного интерфейса вывода графиков функций одного переменного на графопостроитель, АЦПУ и видеотерминал // Методы и средства обработки сложной графической информации: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. 13-15 сент. 1988: В 2 ч. - Горький, 1988. Ч. I. - С. 162.



НТБ
ДНУЖТ

Коротенко Леонид Михайлович

Моделирование боковых колебаний железнодорожной цистерны с учетом подвижности жидкого груза.

05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Подписано к печати 09.06.89 БГ00139, Формат 60 x 84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл. печ. л. 1,16.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 1045. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа

320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Акад. Лазаряна, 2.