МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА имени М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ТУЛЬЧИНСКАЯ Наталья Борисовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ
ДВИЖЕНИЯ ПоеЗДОВ КАК СТЕРЖНЕЙ
С СИНГУЛЯРНОЙ ПОДАТЛИВОСТЬЮ

05.22.07 — Подвижной состав и тяга поездов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1978

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института механики Академии наук Украинской ССР и Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта имени М. И. Калинина.

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор технических наук, профессор **В. А. Лазарин**.

Научный консультант по применению метода сплайн-преобразования к исследованию колебаний стержней с сингулярной податливостью: кандидат технических наук, доцент **С. И. Конашенко**.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **С. М. Куценко**,
кандидат технических наук, доцент **О. М. Савчук**.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Защита состоится «13» апреля 1978 г. в «14» часов на заседании специализированного совета К 114.07.01 в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта имени М. И. Калинина (Днепропетровск, 320629, ГСП, ул. Университетская, 2).

Работу можно ознакомиться в библиотеке Института.

«7» марта

1978 г.

Секретарь специализированного совета,
доктор технических наук, доцент **Л. В. Петрович**.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Высокие темпы развития народного хозяйства страны, определенные Директивами XXV съезда КПСС, требуют повышения производительности как магистрального, так и промышленного железнодорожного транспорта, осуществления мер по улучшению использования транспортных средств (более интенсивной и рациональной их эксплуатации), а также создания новых конструкций подвижного состава.

Повышенные требования, предъявляемые к современному железнодорожному транспорту, и задачи совершенствования существующих и создания новых видов транспортных средств обуславливают необходимость развития теоретических и экспериментальных методов исследования динамики подвижного состава железных дорог.

6760a

Одним из основных направлений в области динамики транспортных средств является исследование динамической нагруженности подвижного состава железных дорог при продольных колебаниях и переходных режимах движения поездов. Это обусловлено тем, что динамические нагрузки, действующие на подвижной состав при таких режимах движения, могут достигать величин, являющихся опасными для прочности конструкций и сохранности транспортируемых грузов.

Экспериментальные исследования, связанные с выяснением закономерности распределения сил по длине поезда при переходных режимах движения, установлением соответствия их величин принятым нормам МПС для расчета вагонов, требуют значительных затрат средств и времени. Поэтому уточнение расчетных схем подвижного состава, дальнейшее развитие теоретических методов исследования продольных колебаний и переходных режимов движения поездов являются актуальными задачами. Следует иметь в виду то немало -

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

НТБ
ДНУЖТ

важное обстоятельство, что разработка теоретических методов и проводимые с их помощью исследования переходных режимов движения поездов позволяют еще на этапе проектирования новых транспортных систем закладывать в них высокие показатели эффективности и качества, а также способствуют разработке требований и норм проектирования элементов перспективных конструкций подвижного состава железных дорог.

Цель работы состоит в разработке методики теоретических исследований продольных колебаний и переходных режимов движения одномерных систем как стержней с сингулярной податливостью, в частности поездов, в случаях, когда зазоры в междвагонных соединениях не оказывают влияния на переходный процесс; в уточнении границ целесообразной области применения известных расчетных схем поезда; в изучении влияния неоднородности (по жесткости) состава, сосредоточенных масс тележек и способов задания возмущающих нагрузок на динамические усилия при переходных режимах движения; в исследовании динамической нагруженности миксерных поездов в случаях, когда зазоры в междвагонных соединениях не оказывают влияния на переходные процессы, а также в случаях, когда такое влияние имеется.

Общая методика исследования. При получении аналитического решения задачи о продольных колебаниях и переходных режимах движения поездов, когда зазоры в междвагонных соединениях отсутствуют или не оказывают влияния на переходный процесс, применяется аппарат теории обобщенных функций, сплайн-преобразование аргумента и используется понятие сингулярной податливости. Исследование продольных усилий в этом случае проводится с помощью программ, составленных для цифровой вычислительной машины "Минск-22М".

НТБ
ДНУЖТ

В тех случаях, когда зазоры в межвагонных соединениях оказывают влияние на переходный процесс, исследование проводится путем численного интегрирования соответствующей системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений на ЭЦВМ.

Научная новизна. Исследование продольных колебаний и переходных режимов движения поездов проводится с помощью принципиально новой расчетной схемы в виде системы стержней, соединенных упругими элементами (стержень с сингулярной податливостью).

Использование понятия сингулярной податливости, применение сплайн-преобразования аргумента и аппарата теории обобщенных функций позволило получить аналитическое решение задачи о колебаниях неоднородного стержня с сосредоточенными включениями в жесткость и массу, имитирующими соответственно упругую податливость межвагонных соединений и тележки вагонов.

При получении решения в случае свободных колебаний применен сдвиг мест расположения скачков интенсивности массы и сосредоточенных включений в жесткость, что не приводит к изменению инженерной задачи, но значительно упрощает получение решения.

Показано, как с помощью стержня с сингулярной податливостью можно судить о применимости расчетных схем поезда в виде сплошного стержня и дискретной системы к решению задач о переходных режимах движения поездов (в частности, составленных из передвижных миксеров).

Рассмотрены различные способы задания возмущающих нагрузок. Получено аналитическое решение задачи о пуске в ход электропоезда несколькими тяговыми двигателями, позволяющее определять продольные усилия во всех сечениях электропоезда и других типов

поездов при рассредоточенной по длине составов тяге.

При решении задач о торможении поезда интенсивность тормозной силы рассматривается как кусочно-непрерывное (переменной интенсивности) и дискретно распространяющиеся вдоль состава возмущения.

Получено аналитическое решение задачи об ударе сцепов вагонов через упруго-вязкий амортизатор о преграду.

Исследована динамическая нагруженность продольными силами нового типа поездов, составленных из передвижных миксеров, при переходных режимах движения.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет исследовать переходные режимы движения поездов с помощью расчетной схемы, которая представляет собой систему стержней, соединенных упругими элементами (стержень с сингулярной податливостью).

Проведенное исследование динамической нагруженности миксерных поездов при переходных режимах движения позволило дать заключение о возможности эксплуатации поездов, составленных из 6-10 миксеров весом брутто 360 т каждый.

Предлагаемая методика исследования динамической нагруженности подвижного состава железных дорог при неустановившихся режимах движения поездов может быть использована конструкторскими бюро и отраслевыми НИИ министерств тяжелого и транспортного машиностроения и путей сообщения при оценках динамической нагруженности и прочности подвижного состава на этапах разработки, проектирования и эксплуатации транспортных средств, в особенности таких как длиннобазные платформы, транспортеры большой грузоподъемности, а также миксеры весом брутто 360-1200 т.

Содержащиеся в диссертационной работе результаты могут быть также использованы научно-исследовательскими организациями,

НТБ
ДНУЖТ

занимающимися развитием методов решения задач прикладной механики и исследованиями различных механических систем, расчетные схемы которых (либо их части) можно представить в виде составного стержня (стержня с сингулярной податливостью) с переменными по длине параметрами и сосредоточенными включениями в интенсивность массы и жесткость.

Апробация. Основные положения работы доложены на: научно-технической конференции ДИИТа, посвященной 50-летию образования СССР (Днепропетровск, 1972), семинаре по механике ДО ИМ АН УССР и ДИИТ (1974), общегородском семинаре "Общая механика" (Днепропетровск, 1976, 1977), юбилейной научно-технической конференции ДИИТа по проблемам железнодорожного транспорта (1977), Всесоюзной конференции "Проблемы механики наземного транспорта" (Днепропетровск, 1977), Всесоюзной научно-технической конференции "Борьба с шумом и вибрацией на железнодорожном транспорте" (Ленинград, 1977), юбилейной сессии Днепропетровского научного центра АН УССР (Днепропетровск, 1977).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 6 печатных работах.

Структура работы обусловлена выбором метода решения задач о колебаниях систем с распределенными параметрами. Так как для отыскания усилий, возникающих при переходных режимах движения поездов, применяется способ разложения решения по формам собственных колебаний недемпфированной системы, то в первой главе рассматривается решение задачи о свободных колебаниях системы. Вторая глава посвящена определению продольных усилий, возникающих при неустановившихся режимах движения поездов и соударениях сцепов вагонов. В третьей главе исследуется динамическая нагруженность миксерных поездов продольными силами, развивающи-

мися при переходных режимах движения поездов.

Объем работы. Диссертация изложена на 131 странице текста, содержит 72 рисунка, 10 таблиц, в списке литературы 110 наименований. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и описки литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические основы исследования динамики подвижного состава, относящиеся к актуальным проблемам прикладной механики, заложены в работах Н.Е.Жуковского. Большие заслуги в дальнейшей разработке теоретических методов исследований и применении их к решению конкретных задач динамики подвижного состава принадлежат отечественным ученым В.А.Лазаряну, М.В.Винокурову, В.Б.Меделю, Л.Н.Никольскому, Е.Н.Никольскому, И.П.Исаеву, Л.А.Шадуру, С.В.Вершинскому, И.И.Челнокову, А.У.Галееву, С.М.Кущенко, М.Ф.Вериге, А.А.Львову, Т.А.Тибиллову, Е.П.Блохину, М.Л.Коротенко, Н.А.Панькину, В.Ф.Ушкалову и др.

Исследования динамики подвижного состава, имеющие большое теоретическое и практическое значение, успешно ведутся коллективами научных сотрудников ЦНИИ МПС, ВНИИ вагоностроения, ДОИМ АН УССР, МИИТ, ДИИТ, ХПИ, РИИЖТ и др.

Большой вклад в развитие методов исследования переходных режимов движения поездов сделан академиком АН УССР В.А.Лазаряном и его учениками. В соответствии с современными и перспективными конструкциями подвижного состава им обобщены и значительно видоизменены расчетные схемы поезда, предложенные Н.Е.Жуковским. Поезд представляется либо в виде цепочки материальных точек, имитирующих вагоны и соединенных между собой упругими, упруго-вязкими или другими элементами, которые могут быть и не-

НТБ
ДНУЖТ

линейными, либо в виде сплошного стержня с упругими несовершенствами и грузами, имитирующими локомотивы.

В ряде случаев целесообразно использование третьей расчетной схемы поезда в виде составного стержня, т.е. системы, в которой отдельные стержни соединены деформируемыми элементами. Особенностью такой расчетной схемы является то, что для нее может быть построена математическая модель, в которой жесткость соединения учитывается в выражении продольной жесткости стержня при помощи импульсивной функции первого порядка. При этом получается "стержень с сингулярной податливостью" (см. книгу В.А.Лазарян, С.И.Конашенко "Обобщенные функции в задачах механики", К., "Наукова думка", 1974). Такая расчетная схема может быть дополнена сосредоточенными массами, жестко связанными со стержнем и имитирующими тележки вагонов. Можно полагать, что третья расчетная схема более точно отражает распределение масс и жесткостей в системе. Обе рассмотренные ранее расчетные схемы могут быть получены из нее при предельных значениях отдельных параметров.

Следует иметь в виду, что обе первые расчетные схемы и результаты, полученные с их помощью, прошли всестороннюю апробацию и экспериментальную проверку. Это обстоятельство позволяет при определении продольных усилий в междвагонных соединениях поездов с помощью третьей расчетной схемы не прибегать к каким-либо дополнительным экспериментальным обоснованиям возможности использования последней для указанных целей.

В первой главе рассматриваются собственные продольные колебания поездов, расчетная схема которых представляется стержнем с сингулярной податливостью, т.е. составным стержнем, имеющим сосредоточенные включения в продольную жесткость. При этом от-

дельные стержни, из которых состоит составная, имитируют вагоны поезда, а связи между ними - межвагонные соединения. Эти соединения предполагаются точечными, т.е. длина элемента, соединяющего отдельные стержни, стремится к нулю. Жесткость таких элементов имеет определенную величину, соответствующую жесткости двух последовательно соединенных поглощающих аппаратов, и учитывается в выражении продольной жесткости при помощи импульсивной функции первого порядка. При этом величина, обратная жесткости, то есть податливость, оказывается сингулярной функцией

$$\frac{1}{EF(x)} = \frac{1}{EF_0} \left\{ \left[1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \sigma_0(x-a_i^*) \right]^2 + \sum_{i=1}^n EF_0 c_i^{-1} \sigma_1(x-a_i^*) \right\} \quad (1)$$

Здесь EF_0 - базисная жесткость стержня при $0 < x < a_1$; α_i - параметр, характеризующий изменение жесткости при переходе от участка $a_{i-1} < x < a_i$ к участку $a_i < x < a_{i+1}$; $\sigma_0(x-a_i^*)$ - единичная функция; c_i - жесткость упругого элемента между частями стержня в сечении $x=a_i^*$ ($a_i^* = a_i - \theta$)

Интенсивность массы аппроксимируется кусочно-постоянной функцией с особенностями в конечном числе точек

$$m(x) = m_0 \left[1 + \sum_{i=1}^n \beta_i \sigma_0(x-a_i^*) + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n+1} \beta_{ij}^* \sigma_1(x-a_{ij}^*) \right] \quad (2)$$

(сосредоточенные массы тележек учитываются при помощи импульсивной функции $\sigma_1(x-a_{ij}^*)$). Здесь m_0 - интенсивность массы при $0 < x < a_1$; β_i - параметр ее скачка при переходе от участка $a_{i-1} < x < a_i$ к участку $a_i < x < a_{i+1}$; $\beta_{ij}^* = M_{ij}^* m_0^{-1}$ M_{ij}^* - величина массы, сосредоточенной в сечении $x=a_{ij}^*$

Продольные колебания системы с переменными распределенными параметрами, как известно, могут быть описаны гиперболическим дифференциальным уравнением второго порядка в частных производ-

НТБ
ДНУЖТ

ных с переменными коэффициентами (I) и (2). Решение отыскивается путем разложения в ряд по формам собственных колебаний недемпфированной системы.

При решении задачи о собственных значениях и фундаментальных функциях для усилий и перемещений одномерных систем, совершающих продольные колебания, с кусочно-постоянными интенсивностью массы, продольной жесткостью и сосредоточенными включениями в массу и жесткость, применяется способ, основанный на сплайн-преобразовании независимого переменного $x = \xi + \sum_{i=1}^n (\xi - \xi_i) \gamma_i G_i(\xi - \xi_i)$, и используются обобщенные функции (см. вышеуказанную книгу В.А.Лазаряна и С.И.Конашенко), что позволяет получить единые, годные для всего стержня аналитические выражения, которыми определяются усилия и перемещения при колебаниях.

Расчетная схема поезда в виде стержня с сингулярной податливостью обладает рядом особенностей, которые проявляются, в частности, в распределении собственных частот в спектре, а также в нормальных формах колебаний и им соответствующих фундаментальных функциях.

Использование функции распределения собственных частот и ее производной - плотности собственных частот позволяет наглядно показать отличие спектра частот стержня с сингулярной податливостью от спектра частот сплошного стержня.

Если частоты колебаний для сплошного однородного стержня образуют равномерный дискретный спектр, то для стержня с сингулярной податливостью спектр собственных частот неравномерный.

Для третьей расчетной схемы при малом количестве вагонов в составе и соответствующих обычным поездам соотношениях жесткостных и инерционных параметров, низшие частоты и фундаментальные функции близки к тем, какие получаются для дискретной систе-

ны. Далее наблюдается сгущение частот в спектре вблизи значений $\lambda = \mathcal{F}$ (вторая группа), $\lambda = 2\mathcal{F}$ (третья группа) и т.д. При этом значения всех частот внутри группы оказываются достаточно близкими между собой. Величина нижней частоты второй группы значительно отличается от значения высшей частоты первой группы.

Фундаментальные функции для перемещений и усилий получаются различными. Фундаментальные функции для перемещений имеют разрывы непрерывности первого рода в местах, соответствующих расположению междвагонных соединений. Разрывы непрерывности в решении получаются автоматически, так как в конечном счете отыскивается разрывное решение дифференциального уравнения с сингулярными коэффициентами. Если усилия в упругих элементах, соединяющих стержни, равны нулю, то фундаментальные функции для перемещений представляют собой непрерывные в этих точках функции.

Фундаментальные функции для усилий – непрерывные, но негладкие – с разрывами непрерывности I рода первых производных в местах расположения междвагонных соединений. Нижние фундаментальные функции для усилий близки к кусочно-линейным. Если усилия в междвагонных соединениях равны нулю, то формы колебаний для усилий не имеют переломов.

Что касается высших форм колебаний, то можно утверждать, что они существенно зависят от деформации не только связей между стержнями, но и самих стержней.

В тех случаях, когда учитываются сосредоточенные массы, имитирующие тележки вагонов, фундаментальные функции для усилий, полученные для стержня с сингулярной податливостью, отличаются от аналогичных для сплошного стержня. Для каждой фундаментальной функции сплошного стержня скачки в местах расположения тележек, равные силам инерции соответствующих грузов, различны по вели-

чине на длине каждого вагона. Для поезда, рассматриваемого как стержень с сингулярной податливостью, эти скачки в пределах каждого из вагонов практически равны между собой.

Наглядное представление распределения собственных частот и соответствующих им нормальных форм колебаний стержня с сингулярной податливостью позволяет получить достоверную информацию об особенностях колебаний, связанных с локальными изменениями жесткости (в междвагонных соединениях) и массы (по длине отдельных вагонов), что может быть существенным не только при определении усилий в междвагонных соединениях, но и при установлении распределения их по длине каждого вагона.

Во второй главе исследуются динамические усилия, возникающие при переходных режимах движения поездов и сцепов вагонов, в случаях, когда зазоры в междвагонных соединениях не влияют на переходный процесс, а в качестве расчетной схемы поезда берется стержень с сингулярной податливостью.

Исследование переходных режимов движения поездов имеет главной целью определение динамических усилий в сечениях поезда. Поэтому имеет известные преимущества решение задачи о пуске поезда в ход и его торможении, а также решение задачи о соударении сцепов вагонов не в перемещениях, как это обычно делается, а в усилиях, т.е. путем использования известного дифференциального уравнения колебаний, составленного для усилий

$$\begin{aligned} (1+\mu \frac{d}{dt}) \left[\frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial x^2} - \frac{m'(x)}{m(x)} \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \right] - \frac{m(x)}{EF(x)} \frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial t^2} = \\ = (1+\mu \frac{d}{dt}) \left[\frac{m'(x)}{m(x)} q(x,t) - \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

НТБ
ДНУЖТ

(μ - коэффициент вязкости; $q(x, t)$ - интенсивность возмущающей нагрузки). Решение уравнения (3) отыскивается путем разложения усилий $S(x, t)$ в ряд по фундаментальным функциям $S_j(x)$ для усилий. Интенсивность возмущающей нагрузки удобно задавать, используя обобщенные функции.

Получено аналитическое решение задачи о пуске в ход электропоезда тяговыми двигателями моторных вагонов, которые рассредоточены по длине состава. При этом интенсивность возмущающей нагрузки может быть представлена выражением

$$q(x, t) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{m_j} F_{ij} \left[1 - e^{-\lambda_{ij}(t-t_{ij})} \right] \sigma_i(x-a_{ij}^*) \sigma_j(t-t_{ij}),$$

где F_{ij} - максимальное значение силы тяги, приложенной к j -ой тележке i -го моторного вагона; t_{ij} - время запаздывания начала действия этой силы по отношению к первой из прикладываемых сил в сечении $x-a_{ij}^*$ ($a_{ij}^* = a_{ij} - \theta$) λ_{ij} - параметр, характеризующий быстроту нарастания силы. Определяются усилия при синхронном включении всех тяговых двигателей и показано, что неодновременность включения тяговых двигателей приводит к значительному росту как сжимающих, так и растягивающих усилий.

При решении задач о торможении поездов интенсивность тормозной силы, действующей на поезд, обычно представляют как непрерывно распространяющееся вдоль состава возмущение постоянной величины. В отличие от этого в работе дано аналитическое решение в случае, когда интенсивность тормозной силы, действующей на поезд, рассматривается как кусочно-непрерывное (переменной интенсивности) распространяющееся вдоль состава возмущение

$$q(x, t) = - \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{i=1}^{m_j} \mu_{ij} \left[1 - e^{-\delta_{ij}(t-t_{ij})} \right] \left[\sigma_j(x-a_{ij}^*) - \sigma_j(x-a_{ij+1}^*) \right] \sigma_j(t-t_{ij}).$$

НТБ
ДНУЖТ

Здесь $a_{z,p}^* = a_{z,p} + \theta$ $a_{z,p+1}^{**} = a_{z,p+1} - \theta$ - координаты сечений слева и справа от сосредоточенных включений в жесткость и массу; $W_{z,p}$ - интенсивность тормозной силы, действующей на участке $a_{z,p}^* < x < a_{z,p+1}^{**}$ в течение промежутка времени $t_{z,p} = \frac{l - a_{z,p}^*}{c}$ $\delta_{z,p}$ - некоторый коэффициент, определяющий скорость нарастания тормозной силы; l - длина поезда; c - скорость распространения тормозной волны. Такое задание возмущающей нагрузки позволяет учитывать то, что интенсивность торможения вагонов в поезде может быть различной.

Так как воздействие тормозной силы на вагон осуществляется через колесные пары тележек, то для рассматриваемой расчетной схемы представляется возможным в качестве точек ее приложения выбрать места расположения сосредоточенных масс, имитирующих тележки. При этом интенсивность возмущающей нагрузки (тормозной силы) может быть выражена аналитически следующим образом

$$q(x,t) = - \sum_{j=1}^N \sum_{y=1}^{n_j} W_{j,y} \left[1 - e^{-\delta_{j,y}(t-t_{j,y})} \right] \sigma_j(x - a_{j,y}^*) \sigma_{j,y}(t - t_{j,y}).$$

Сила $W_{j,y}$, тормозящая j -ю тележку t -го вагона, равна нулю до момента времени $t_{j,y} = \frac{l - a_{j,y}^*}{c}$, а затем нарастает в течение промежутка времени $t - t_{j,y}$ по экспоненциальному закону; $a_{j,y}^* = a_{j,y} - \theta$ - абсцисса точки приложения тормозной силы. Дискретное распространение тормозной силы, когда в качестве точки ее приложения выбирается сосредоточенная масса, имитирующая тележку с колесными парами, более точно отражающее воздействие тормозных сил на вагоны поезда, следует рассматривать при определении продольных усилий в отдельных сечениях вагонов.

Аппарат теории обобщенных функций можно также применить к исследованию процессов соударения сцепов вагонов, которые представляются системой стержней, соединенных податливыми элемента-

ми (стержень с сингулярной податливостью). Получено аналитическое решение задачи об ударе сцепов вагонов через упруго-вязкий амортизатор о жесткую преграду, позволяющее определять продольные усилия в различных сечениях сцепа вагонов. При этом использован способ разложения искомого решения по фундаментальным функциям задачи.

Третья глава посвящена исследованию динамической нагруженности миксерных поездов. Увеличение выплавки металла и специализация предприятий металлургической промышленности обусловили необходимость транспортировки расплавленного чугуна на большие расстояния. Для перевозки жидкого чугуна как по промышленным железнодорожным путям металлургических предприятий, так и по магистральным путям ИПС, был создан передвижной миксер грузоподъемностью 150 тонн. Вес одного миксера брутто составляет 360 тонн. Необходимость одновременной перевозки большого (не менее 450 т) количества расплавленного металла от доменных печей одного предприятия к конверторным цехам другого предприятия по магистральным путям ИПС поставили вопрос о возможности транспортировки чугуна миксерными поездами. При этом одной из основных сторон обоснования возможности эксплуатации миксерных поездов является исследование продольных усилий, возникающих при переходных режимах движения таких поездов. Рассматриваются пуск в ход и торможение. При малой длине поезда (3-10 миксеров длиной 32,6 м каждый) и скоростях движения до 50 км/ч (предполагаемых на начальной стадии эксплуатации) эти режимы являются определяющими с точки зрения наибольших продольных усилий.

Так как миксерные поезда отличаются от обычно эксплуатируемых на железных дорогах, то выбор расчетной схемы миксерного поезда для теоретических исследований основывается на сопостав-

НТБ
ДНУЖТ

лении результатов, полученных в линейной постановке на основании разработанной в главах I и II методики исследования продольных колебаний и переходных режимов движения поездов. Сопоставляются результаты, полученные по трем расчетным схемам: сплошной стержень; дискретная система абсолютно твердых тел, соединенных упруго-вязкими элементами; составной стержень, состоящий из стержней, соединенных упруго-вязкими элементами и рассматриваемый как стержень с сингулярной податливостью. Предельный переход от стержня с сингулярной податливостью к сплошному стержню и дискретной системе абсолютно твердых тел, соединенных упруго-вязкими элементами, позволяет, с помощью полученных в главе II аналитических решений, исследовать продольные усилия в миксерном поезде, представленном первыми двумя расчетными схемами.

Анализ результатов, полученных при пуске в ход и торможении миксерных поездов по трем расчетным схемам, показал, что при исследовании продольных усилий в автосцепных устройствах миксерного поезда, когда зазоры не оказывают влияния на переходный процесс, следует пользоваться расчетной схемой поезда либо в виде стержня с сингулярной податливостью, либо в виде дискретной системы, а не в виде сплошного стержня. Если необходимо знать изменение либо распределение продольных усилий по длине каждого миксера, следует пользоваться расчетной схемой поезда в виде стержня с сингулярной податливостью. В таких случаях можно также воспользоваться и расчетной схемой поезда, в которой каждый экипаж представлен конечным числом абсолютно твердых тел, соединенных упруго-податливыми элементами. Однако последнее приведет к значительному увеличению порядка рассматриваемой системы дифференциальных уравнений и как следствие - к затрате большого количества машинного времени на численное интегрирование системы.

НТБ
ДНУЖТ

Для исследования продольных усилий, возникающих при пуске в ход сжатых поездов и торможении растянутых поездов, когда проявляются зазоры, используется, разработанная в школе академика АН УССР В.А.Лазаряна, методика исследования переходных режимов движения сложных существенно нелинейных механических систем с помощью численного интегрирования соответствующей системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений.

Для оценки верхних границ максимальных усилий, возникающих при пуске в ход предварительно сжатых миксерных поездов, предполагается, что сила тяги локомотива нарастает мгновенно до максимального значения. Анализ результатов, полученных при исследовании пуска в ход поезда, составленного из миксеров и локомотива ТЭМ-2, показывает, что уровень продольных сил в соответствии с Нормами расчета вагонов на прочность является допустимым. Характер продольных колебаний и уровень продольных сил в поезде при данном переходном режиме движения существенно зависят от начального состояния состава, главным образом, от распределения вдоль поезда зазоров в упряжи. Величины наибольших значений максимальных усилий в поезде определяются силой тяги локомотива и не зависят от количества миксеров, длины и веса состава.

Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными сотрудниками ВНИИ вагоностроения во время поездных испытаний по определению продольных сил, действующих на миксер в опытном поезде, состоящем из трех груженых миксеров, вагона-лаборатории и локомотива ТЭМ-2.

Наиболее опасным с точки зрения возникновения наибольших растягивающих продольных сил является пуск в ход сжатого поезда. Однако и в этом случае максимальные продольные усилия, которые имеют место при пуске в ход поездов, составленных из 3-10 миксе-

ров, не превосходят величин, допускаемых Нормами расчета вагонов на прочность. Поэтому какие-либо дополнительные ограничения (отличные от предусмотренных ПТЭ для магистрального подвижного состава) для эксплуатации поездов, составленных из 3-10 миксеров, с точки зрения режимов пуска в ход не будут оправданы.

Исследования продольных усилий при торможении миксерного поезда проводились для экстренного и полного служебного торможений. Регулировочные торможения при малых скоростях движения, установленных для эксплуатации таких поездов (до 50 км/ч), не являются определяющими с точки зрения максимальных величин продольных усилий.

Максимальные значения продольных усилий при торможении существенно зависят от времени и диаграммы наполнения тормозных цилиндров. Диаграммы наполнения тормозных цилиндров принимаются близкими к получаемым по результатам обработки экспериментальных данных для грузового подвижного состава магистральных железных дорог.

Анализ результатов показал, что увеличение количества миксеров в поезде приводит к росту максимальных значений продольных усилий. Так, при экстренном торможении поезда, составленного из шести миксеров и двух локомотивов ТЭМ-2, наибольшая величина максимальных сжимающих усилий при начальной скорости торможения 10 км/ч составляет 83 т, а для поезда, составленного из восьми миксеров и двух локомотивов ТЭМ-2 - 100 т. Торможение при более высоких скоростях движения (40 км/ч) приводит к понижению наибольших значений максимальных усилий.

При полном служебном торможении уровень максимальных усилий меньше, чем при экстренном торможении.

Наибольшие значения продольных усилий, возникающих при

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
Імені академіка В. Лазаряна

НТБ
ДНУЖТ

6760a

торможении поездов, составленных из 3-10 миксеров, в диапазоне начальных скоростей торможения 10-40 км/ч не превосходят допускаемых Нормами расчета вагонов на прочность.

Таким образом, на основании приведенных результатов теоретических исследований, можно утверждать, что и при тормозных режимах возможна (с точки зрения величин продольных усилий) эксплуатация поездов, составленных из 3-10 миксеров грузоподъемностью 150 т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика исследования продольных колебаний и переходных режимов движения поездов с применением аппарата теории обобщенных функций, сплайн-преобразования аргумента и понятия сингулярной податливости.

2. Показано, что при малом количестве вагонов в составе следует пользоваться расчетной схемой поезда в виде стержня с сингулярной податливостью. При помощи предельных переходов можно перейти к расчетным схемам поезда в виде сплошного стержня либо дискретной системы абсолютно твердых тел, соединенных упругими элементами, которые являются частными случаями третьей расчетной схемы.

3. Исследовано влияние неоднородности по жесткости состава и сосредоточенных масс тележек на динамические характеристики поезда, а также способов задания возмущающих нагрузок на продольные усилия при переходных режимах движения. Показано, что:

- для поездов, составленных из малого количества тяжелых единиц подвижного состава (миксерные поезда и т.п.), при исследовании продольных усилий в междвагонных соединениях целесообразно пользоваться расчетной схемой либо в виде стержня с сингу -

НТБ
ДНУЖТ

лярной податливостью, либо в виде дискретной цепочечной системы материальных точек, имитирующих вагоны;

- сосредоточение масс тележек в местах, соответствующих их расположению в обычных вагонах и вагонах электроподвижного состава магистральных железных дорог, практически не влияет на уровень продольных усилий в межвагонных соединениях. Однако при исследованиях продольных усилий в различных сечениях одного и того же вагона необходимо принимать во внимание массы, имитирующие тележки и сосредоточенные в местах, соответствующих их расположению в вагонах;

- при решении задач о торможении поездов интенсивность тормозной силы, действующей на состав, можно рассматривать как непрерывное, кусочно-непрерывное или дискретно распространяющееся вдоль поезда возмущение. В тех случаях, когда интенсивность торможения вагонов в поезде различна, целесообразно рассматривать тормозную силу как распространяющееся кусочно-непрерывно и имеющее переменную интенсивность возмущение. Если цель исследований является определение усилий в отдельных сечениях вагонов, то интенсивность тормозной силы следует рассматривать как дискретно распространяющееся вдоль состава возмущение, действующее на вагоны в местах расположения тележек.

4. Дано аналитическое решение задачи об ударе сцепов вагонов, рассматриваемых как система неоднородных стержней, соединенных упругими элементами (стержень с сингулярной податливостью), через упруго-вязкий амортизатор о жесткую преграду. Показана возможность определения продольных усилий, развивающихся при соударениях сцепов в тех случаях, когда зазоры в межвагонных соединениях отсутствуют или не оказывают влияния на переходный процесс.

НТБ
ДНУЖТ

5. Результаты исследований продольных сил, действующих как в предварительно растянутых, так и в сжатых поездах, состоящих из 2-4 миксеров, показали, что максимальные усилия, возникающие при пуске в ход и торможении, меньше величин, предусмотренных Нормами расчета вагонов на прочность, что позволило сделать вывод (с точки зрения величин продольных усилий) о возможности эксплуатации таких поездов.

6. Результаты теоретических исследований установлено, что при увеличении количества миксеров грузоподъемностью 150 т в составе поезда до 8 единиц динамические продольные силы возрастают, но не превышают 100 т, что позволило увеличить количество миксеров в эксплуатирующихся составах до 10 единиц.

7. Внедрение в эксплуатацию миксерных поездов позволило получить в 1977 г. при транспортировке расплавленного чугуна от доменных печей к конверторным цехам по заводским путям и путям МПС фактический эффект 17,4 млн. руб. Акты, расчеты экономического эффекта и справки об объемах внедрения в 1977 г., утвержденные министерствами тяжелого и транспортного машиностроения, черной металлургии, путей сообщения, а также организациями и предприятиями, которые разработали, исследовали и внедрили в эксплуатацию миксерные поезда, приложены к диссертационной работе.

Вклад в создание экономического эффекта Днепропетровским отделением Института механики АН УССР, обосновавшим (результатами теоретических исследований переходных режимов движения миксерных поездов) возможность транспортировки чугуна поездами, составленными из 6-10 миксеров грузоподъемностью 150 тонн, составил 3,0 млн. рублей.

НТБ
ДНУЖТ

Основное содержание диссертации изложено
в следующих работах:

1. ТУЛЬЧИНСКАЯ Н.Б. Об отыскании частот и форм продольных колебаний системы упругих стержней, соединенных между собой упругими связями. - В кн.: Труды ДИИТ, вып.152, Днепропетровск, 1973, с.65-71.

2. КОНАШЕНКО С.И., НАУМЕНКО Н.Е., ТУЛЬЧИНСКАЯ Н.Б., РЕПЕТА В.Е. Применение обобщенных функций к исследованию колебаний неоднородных поездов и экипажей о грузом. - В кн.: Труды БИТМ, вып.26, Брянск, 1974, с.193-199.

3. КОНАШЕНКО С.И., ТУЛЬЧИНСКАЯ Н.Б. Спектры собственных частот и нормальные формы продольных колебаний сплошных стержней с особенностями. - В кн.: "Динамика и прочность высокоскоростного наземного транспорта", Киев, "Наукова думка", 1976, с.20-24.

4. КОНАШЕНКО С.И., ТУЛЬЧИНСКАЯ Н.Б. О переходных режимах движения стержней с сосредоточенными включениями в жесткость и массу. - В кн.: Труды ДИИТ, вып.182/22, Днепропетровск, 1976, с.49-56.

5. ЛАЗАРЯН В.А., КОНАШЕНКО С.И., РЕПЕТА В.Е., ТУЛЬЧИНСКАЯ Н.Б. Применение обобщенных функций к исследованию стационарных и нестационарных режимов колебаний подвижного состава. - Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Борьба с шумом и вибрацией на железнодорожном транспорте". Ленинград, 1977, с.78.

6. КАЗАНСКИЙ Г.А., КОКОРЕВ В.А., КОГАН С.М., ТУЛЬЧИНСКАЯ Н.Б. Разработка ходовой части, исследование и внедрение в эксплуатацию миксерных поездов, предназначенных для транспортировки расплавленного чугуна. - Материалы Всесоюзной конференции "Проблемы механики наземного транспорта", Киев, "Наукова думка", 1977, с.13-16.

НТБ
ДНУЖТ

Бт 42062. Подписано к печати 7.И.78 г. Сдано в производство
9.П.78 г. Тираж 130. Зак. № 4380. Усл.п.л. I, 39.

Городская типография № 3 Днепропетровского областного
управления по делам издательства, полиграфии и книжной
торговли, 320002, г.Днепропетровск, ул. Фрунзе, 6.

НТБ
ДНУЖТ