

11

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНО-
ДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Б74

БОГОМАЗ ГЕОРГИЙ ИВАНОВИЧ

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПУСКА В ХОД НАЛИВНЫХ Поездов

01.02 06. - Динамика, прочность и надежность
машин, приборов и аппаратуры

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1974

НТБ
ДНУЖТ

68830

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

БОГОМАЗ ГЕОРГИЙ ИВАНОВИЧ

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПУСКА В ХОД НАЛИВНЫХ ПОВЗДОВ

01.02.06. - Динамика, прочность и надежность
машин, приборов и аппаратуры

888a

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Днепропетровск

1974

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

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института
металлов АН УССР

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР,
доктор технических наук, профессор В.А.ЛАЗАРЯН

Кандидат технических наук А.В.РЫЖОВ

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук Е.П.БЛОХИН

Доктор физико-математических наук Д.А.ГОРШКО

Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский
институт вагоностроения.

Автореферат разослан "23" августа 1974 г.

Защита диссертации состоится "23" сентября 1974 г.
в 14⁰⁰ час. на заседании Ученого Совета Днепропетровского институ-
та инженеров железнодорожного транспорта (Днепропетровск-Ю,
ул. Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета
доцент

А.Ф.ЛОГВИН

НТБ
ДНУЖТ

Развитие железнодорожного транспорта требует всестороннего изучения динамических процессов, происходящих при переходных режимах движения поездов. Необходимость таких исследований обусловлена тем, что в течение сравнительно малой длительности неустановившихся процессов, протекающих в поезде при переходе из одного состояния в другое, в его упряжных приборах зачастую возникают значительные усилия.

Исследования динамических усилий, возникающих при неустановившихся режимах движения поездов, проведенные Н.Е.Жуковским, А.М.Годыцким-Цвирко, В.А.Лазаряном, Ф.В.Флоринским, С.В.Вершинским и другими, позволили решить широкий круг вопросов, имеющих большое теоретическое и практическое значение.

Большинство выполненных ранее работ посвящено исследованию переходных режимов движения поездов, составы которых загружены неподвижными относительно вагонов твердыми грузами.

В настоящее время на железных дорогах страны перевозятся большое количество грузов, которые невозможно каким-либо образом закрепить в вагоне. К таким грузам, в первую очередь, относятся различные жидкости: нефть, нефтепродукты, кислоты, клеи и т.д. Увеличение перевозок наливных грузов, вызванное бурным ростом нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, химической и других видов промышленности, делает задачу исследования переходных режимов движения наливных поездов особенно актуальной.

При исследовании неустановившихся режимов движения наливных поездов необходимо принимать во внимание подвижность жидкости, так как в настоящее время цистерны выпускаются с котлами без расширительных колпаков и для компенсации увеличения объема груза при повышении температуры заполняются с некоторым недоливом. Це-

НТБ
ДНУЖТ

ревозка в универсальных цистернах жидкостей с удельным весом больше единицы также приводит к необходимости эксплуатации цистерн с неполным наливом. Наличие свободной поверхности приводит к появлению колебаний жидкости, которые влияют на движение отдельной цистерны и наливного поезда в целом.

Экспериментальные исследования переходных режимов движения наливных поездов приведены в работе А.А.Долматова и Н.Н.Кудрявцева "Динамика и прочность четырехосных железнодорожных цистерн". Теоретические исследования переходных режимов движения наливных поездов до настоящего времени практически не проводились. В то же время аналогичные исследования для сухогрузных поездов проводятся, в основном, методами математического моделирования, что позволяет значительно сократить объем экспериментальных работ. Естественно, возникает задача разработки методов, которые позволяли бы исследовать неустановившиеся режимы движения наливных поездов при помощи ЭВМ.

Целью настоящей работы являлось создание математической модели наливного поезда с учетом подвижности жидкости в цистернах и исследование на базе этой модели режима пуска поезда в ход.

Расчетная схема наливного состава упрощенно представлена в виде цепочки абсолютно твердых тел (цистерн), соединенных между собой амортизаторами и несущих в себе жидкие массы. Полости, содержащие жидкость, имеют вид горизонтально расположенного кругового цилиндра с сферическими днищами. Масса твердого тела принята равной массе порожней цистерны. Жидкость, частично заполняющая полость, принимается идеальной и несжимаемой. Амортизаторы представляют собой безынерционные нелинейные элементы, свойства которых определяются характеристиками реальных упруго-фрикцион-

НТБ
ДНУЖТ

ных поглощающих аппаратов. Предполагается, что в соединениях между твердыми телами могут иметь место зазоры. Локомотив в расчетной схеме поезда представлен в виде твердого тела, масса которого равна массе реального локомотива.

Положим, что наливной поезд может двигаться только поступательно вдоль идеально ровного и неупругого пути.

В межвагонных соединениях реального поезда, обычно, имеют место зазоры. При перемещении цистерны в пределах зазора она не взаимодействует с соседними. Поэтому расчетную схему поезда, очевидно, нужно строить состоящей из отдельных звеньев, каждое из которых представляет собой механическую модель одиночной цистерны. Таким образом, число звеньев расчетной схемы равно числу цистерн в поезде и может быть довольно большим (порядка 60-70-ти и более). Следовательно, основной задачей, возникающей при составлении расчетной схемы поезда, является построение достаточно простой математической модели одиночной цистерны, которая позволяла бы получить решение с требуемой точностью.

Теоретическое определение движения твердого тела, частично заполненного жидкостью, в общем случае сопряжено с решением нелинейных уравнений гидродинамики и представляет значительные трудности.

Исследованию продольных и поперечных колебаний железнодорожной цистерны посвящены работы П.И.Горькова, И.Ф.Вериги, А.А.Долматова, Н.Н.Кудрявцева, А.А.Львова, Д.С.Романа, В.И.Перехреста, В.И.Черкашина, М.М.Соколова и других авторов, в которых решены многие важные вопросы динамики цистерны, частично заполненной жидкостью. Однако результаты этих исследований также не представилось возможным использовать в целях данной работы.

НТБ
ДНУЖТ

Наиболее приемлемыми при построении математической модели одиночной цистерны являются, на наш взгляд, методы, позволяющие перейти от линеаризованной системы "тепло-жидкость" к дискретной механической системе с конечным числом степеней свободы. Эти методы развиты в работах Д.Е.Охочимского, Г.С.Нариманова, Б.И.Рабиновича, Н.Н.Моисеева, В.В.Румянцева и других ученых.

Следуя работам Б.И.Рабиновича, можно записать гидродинамические уравнения продольных колебаний цистерны в следующем виде:

$$\begin{cases} (m_0 + m)\ddot{u} + \sum_{n=1}^{\infty} \Lambda_n \ddot{S}_n = S; \\ \Lambda_n \ddot{u} + \mu_n (\ddot{S}_n + \omega_n^2 S_n) = 0; \\ (n = 1, 2, 3, \dots). \end{cases} \quad (I)$$

Здесь введены обозначения:

m_0 - масса цистерны;

m - масса жидкости;

ω_n - n -я собственная частота колебаний жидкости;

S - заданная внешняя сила, направленная по оси Ox (вдоль продольной оси цистерны);

u - перемещение твердого тела массой m_0 ;

S_n - обобщенная координата;

Λ_n и μ_n - присоединенные массы жидкости, определяемые по формулам:

$$\Lambda_n = \rho \int_{\Sigma} x \frac{\partial \varphi_n}{\partial z} dS; \quad \mu_n = \frac{\rho g}{\omega_n^2} \int_{\Sigma} \left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial z} \right)^2 dS$$

где ρ - плотность жидкости;

Σ - невозмущенная свободная поверхность жидкости;

g - ускорение свободного падения;

$\varphi_n = \varphi_n(x, y, z)$ - собственные функции краевой задачи о колебаниях жидкости в неподвижной полости;

НТБ
ДНУЖТ

x, y, z - координаты жидких частиц (оси координат расположены в центре геометрической симметрии полости; ось Oz направлена вертикально вверх).

Чтобы воспользоваться системой уравнений (I), необходимо определить гидродинамические коэффициенты Λ_n и μ_n . Определение указанных коэффициентов представляет собой самостоятельную задачу, которая сводится, в основном, к нахождению собственных значений ω_n и построению собственных функций φ_n краевой задачи для составляющих потенциала перемещений или скоростей. Решение краевой задачи существенным образом зависит от формы полости. Форма котла железнодорожной цистерны имеет вид горизонтально расположенного кругового цилиндра с двумя сферическими днищами. В этом случае краевая задача может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial z^2} = 0; & \left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} \right|_s = 0 \quad \text{при } r=R; \\ \left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} \right|_s = 0 \quad \text{при } r=R_0; & \left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial z} \right|_z = \frac{\omega_n^2}{g} \varphi_n \Big|_z \end{cases} \quad (2)$$

где s - смоченная поверхность полости;

R - радиус цилиндрической части цистерны;

R_0 - радиус днищ.

Решение задачи (2) проведено вариационным методом Ритца. Для выбора системы координатных функций при решении по методу Ритца применялся способ, предложенный Н.Н.Моисевым. В качестве координатных выбраны собственные функции, известные из аналитического решения краевой задачи о колебаниях жидкости в неподвижной полости, имеющей форму параллелепипеда.

Получены собственные частоты и формы колебаний жидкости в рассматриваемой полости. При этом учитывались только симметрич-

НТБ
ДНУЖТ

ные относительно плоскости Oxz и антисимметричные относительно плоскости Oxy формы колебаний жидкости, т.е. те, которые влияют на движение твердого тела и могут возбуждаться при его движении.

Проведено сравнение частот первых трех тонов колебаний жидкости, полученных теоретически, с имеющимися экспериментальными данными для сосуда, форма которого аналогична форме котла железнодорожной цистерны. Сопадение частот, полученных расчетным путем и экспериментально, вполне удовлетворительное.

Так как значения гидродинамических коэффициентов зависят от номировки, был осуществлен переход от уравнений (I) к уравнениям, коэффициенты которых представляют инвариантные характеристики жидкого заполнения. В этом случае механическая модель одиночной цистерны может быть представлена в виде эквивалентного твердого тела M_i с присоединенными к нему с помощью пружин жесткостью c_{ij} твердыми телами, массы m_{ij} которых равны приведенным массам тех тонов колебаний жидкости, которые учитываются при исследовании (индекс i соответствует номеру рассматриваемой цистерны, j - номеру тона колебаний жидкости). Масса эквивалентного твердого тела определяет ту часть жидкости, которая практически не участвует в движении относительно котла железнодорожной цистерны. Значения инвариантных характеристик вычислены по формулам:

$$m_{ij} = \frac{\Lambda_{ij}^2}{\mu_{ij}}; \quad c_{ij} = \omega_{ij}^2 m_{ij}; \quad M_i = m_{oi} + m_i - \sum_{j=1}^{n^*} m_{ij},$$

где n^* - число тонов колебаний жидкости, учитываемых при исследовании.

На основе полученной расчетной схемы одиночной цистерны построена расчетная схема наливного поезда. Она является одно -

НТБ
ДНУЖТ

мерной разветвленной механической системой, состоящей из отдельных звеньев, соединенных при помощи амортизаторов. Каждое звено представляет собой механическую модель одиночной цистерны. В этом случае математическая модель наливного поезда, учитывающая влияние подвижности жидкости в цистернах, может быть записана в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_0 = \frac{1}{M_0} (F - S_0); \quad \dot{\zeta}_i = V_i - V_{i+1}; \\ \dot{V}_{i+1} = \frac{1}{M_{i+1}} (S_i - S_{i+1} - \sum_{j=1}^{n^*} S_{i+1,j}); \\ \dot{U}_{i+1,j} = \frac{1}{m_{i+1,j}} S_{i+1,j}; \quad \dot{q}_{i+1,j} = V_{i+1} - U_{i+1,j}; \\ S_n = 0; \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n); \quad (j = 1, 2, \dots, n^*), \end{array} \right. \quad (3)$$

где V_0 - абсолютная скорость твердого тела M_0 (локомотива);

V_i - абсолютная скорость твердого тела M_i ;

q_{ij} - относительное перемещение твердых тел m_{ij} и M_i ;

S_{ij} - усилие в пружине, соединяющей твердые тела m_{ij} и M_i ;

ζ_i - относительное перемещение твердых тел M_i и M_{i+1} ;

S_i - усилие в i -м амортизаторе;

F - сила тяги локомотива;

n - число цистерн в поезде.

Порядок системы нелинейных дифференциальных уравнений (3) равен $2n(n^*+1)+2$.

При помощи полученной математической модели было проведено исследование пуска в ход наливного поезда мгновенно нарастающей до постоянного значения силой. В случае, когда зазоры не оказывают влияния на переходные процессы, и без учета рассеивания энергии в амортизаторах решение задачи получено аналитически.

НТБ
ДНУЖТ

При этом решении расчетная схема наливного поезда была представлена в виде одномерной разветвленной системы с распределенными параметрами, движение которой описано линейным интегро-дифференциальным уравнением. Решение этого уравнения проведено операционным методом. Показано, что при исследовании пуска в ход предварительно растянутого поезда можно принимать во внимание только первый тон колебаний жидкости. Показано также, что аналитическое решение задачи можно использовать для определения наибольших усилий в межвагонных соединениях предварительно растянутого наливного поезда.

Исследование пуска в ход механической системы с сосредоточенными параметрами, соответствующей предварительно растянутому наливному поезду, с учетом зазоров и рассеивания энергии было проведено путем численного интегрирования и решения с помощью АЭМ дифференциальных уравнений (3). Численное интегрирование системы уравнений (3) производилось с помощью ЦЕМ "Минск-22", а электронное моделирование - с помощью АЭМ "МН-17М". Решение задачи путем электронного моделирования получено только для $n < 16$, что определялось количеством операционных блоков АЭМ "МН-17М".

Правильность интегрирования системы дифференциальных уравнений (3) проверялась путем сопоставления решений, полученных при помощи АЭМ, ЦЕМ и аналитического решения.

Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, приведенными в указанной выше работе А.А.Долматова и Н.Н.Кудрявцева. Сопоставление показало, что полученная математическая модель наливного поезда удовлетворительно отражает процессы, протекающие в реальном наливном поезде при пуске его в ход.

Моделирование трогания предварительно растянутых наливных

НТБ
ДНУЖТ

поездов показало, что наибольшие усилия возникают примерно в одной трети поезда от локомотива и могут превышать силу тяги локомотива на 20+30%. При пуске в ход предварительно растянутого наливного поезда возникают сжимающие усилия. Однако расчеты показывают, что при коэффициентах рассеивания энергии $\eta=0,5+0,9$, соответствующих характеристикам реальных поглощающих аппаратов, сжимающие усилия незначительны и составляют не более 5+7% от силы тяги.

Исследования влияния длины предварительно растянутого наливного поезда на распределения наибольших усилий показали, что самое большое усилие превосходит силу тяги и увеличивается с увеличением длины поезда до определенного значения. При выбранных параметрах механической системы, которой представлен поезд, увеличение числа цистерн больше 50+60-ти не приводит к заметному увеличению наибольших усилий. Установлено, что при частично заполненных цистернах наибольшие усилия в предварительно растянтом наливном поезде превышают силу тяги локомотива, в то время, как в случае полностью заполненных и порожних цистерн наибольшие усилия равны силе тяги.

Исследование с помощью ЭВМ пуска в ход предварительно растянутых наливных поездов большой длины приводит к необходимости интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Решение таких систем при помощи АМ трудно осуществимо из-за большого количества требуемого оборудования. В связи с этим рассмотрен вопрос снижения порядка системы дифференциальных уравнений при сохранении необходимой точности результатов. Проведенное исследование показало, что объединение нескольких расчетных схем цистерн в одну расчетную схему позволяет в несколько раз понизить порядок системы дифференциальных уравне-

НТБ
ДНУЖТ

ний, описывающих движение наливного поезда.

Зазоры в междвагонных соединениях часто оказывают значительное влияние на переходные режимы движения поездов. В этом случае задача становится существенно нелинейной. В работе проведено исследование пуска в ход предварительно сжатых наливных поездов. Проведенное исследование позволило определить характер изменения усилий в междвагонных соединениях наливного поезда, установить качественные и количественные отличия процессов изменения усилий, полученных с учетом и без учета подвижности жидкости в котлах цистерн. Кроме того, исследование позволило оценить влияние длины поезда, зазоров в междвагонных соединениях, рассеивания энергии поглощающими аппаратами и конструкцией вагонов, а также уровня налива жидкости в цистернах на величину и характер изменения усилий.

В ы в о д ы

Предложена математическая модель наливного поезда, при помощи которой можно учесть влияние подвижности жидкости на изменение усилий в междвагонных соединениях при пуске поезда в ход.

2. Установлено, что процессы изменения продольных усилий в наливном поезде для случая частично заполненных цистерн существенно отличаются от процессов изменения усилий в аналогичном сухогрузном поезде. Для процессов изменения продольных усилий при трогании наливных поездов по сравнению с сухогрузными характерны следующие отличия:

а) наибольшие растягивающие усилия предварительно растянутого наливного поезда оказываются большими на 20+30%;

б) наибольшие значения растягивающих усилий в предварительно сжатом наливном поезде оказываются меньшими на 10+15%, при

этом появляются сжимающие усилия, сопоставимые по величине с растягивающими;

в) наибольшие усилия в междвагонных соединениях предварительно сжатого наливного поезда достигаются не при первом ударе на грузе, а при последующих нагружениях, даже при мгновенно нарастающей силе тяги;

е) переходный процесс оказывается более длительным.

3. Проведено аналитическое решение задачи о пуске в ход предварительно растянутого наливного поезда без учета влияния зазоров и рассеивания энергии. Получены формулы для расчета усилий в сечениях наливного поезда.

4. Показано, что при решении задачи о пуске в ход наливных поездов можно учитывать только первый тон колебаний жидкости в цистернах, а также, что при исследовании наливных поездов с большим числом цистерн порядок системы дифференциальных уравнений можно без ущерба для точности получаемых результатов существенно понизить путем объединения нескольких расчетных схем одиночных цистерн.

5. При помощи ЭВМ проведено исследование влияния рассеивания энергии в поглощающих аппаратах, длины поезда, уровня налива жидкости в цистернах на величины наибольших усилий и их распределения по длине предварительно растянутого наливного поезда. Получены следующие результаты:

а) наибольшие растягивающие усилия возникают примерно в одной трети поезда от локомотива и превышают касательную силу его тяги;

б) увеличение числа цистерн в поезде до 50+60-ти приводит к появлению наибольших растягивающих усилий. Дальнейшее увеличение длины поезда не приводит к заметному изменению усилий;

НТБ
ДНУЖТ

в) величина рассеивания энергии в поглощающих аппаратах автоцепок практически не влияет на величины наибольших усилий.

6. Исследования подварительно сжатых наливных поездов показали следующее:

а) в наливном поезде возникают сжимающие усилия сопоставимые по величине с растягивающими; наибольшие растягивающие усилия практически не зависят от длины поезда;

б) с увеличением зазоров в междвагонных соединениях наибольшие сжимающие и растягивающие усилия увеличиваются;

в) растягивающие усилия практически не зависят от величины рассеивания энергии в поглощающих аппаратах автоцепок, а наибольшие сжимающие усилия уменьшаются на 20+25% при увеличении коэффициента рассеивания энергии от 0,2 до 0,8;

г) на величину наибольших усилий в поезде практически не влияет изменение уровня налива жидкости в цистернах в пределах, отвечающих наиболее часто встречающимся условиям эксплуатации.

НТБ
ДНУЖТ

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Богомаз Г.И. Определение элементов характеристической матрицы, составленной для нахождения собственных частот и форм колебаний жидкости в горизонтальном круговом цилиндре с двумя сферическими днищами. В об. "Алгоритмы и программы для исследования на ЭЦВМ "Минск-22" случайных колебаний дискретных механических систем". Киев, 1972.

2. Рыжов А.В., Богомаз Г.И. Определение гидродинамических коэффициентов уравнений движения железнодорожной цистерны, частично заполненной жидкостью. Труды ДИИТа, вып.152, Днепропетровск, 1974.

3. Лазаря В.А., Рыжов А.В., Богомаз Г.И. Исследование при помощи ЭВМ пуска в ход наливных поездов. Труды ДИИТа, вып.152, Днепропетровск, 1974.

6883а

НТБ
ДНУЖТ

Материалы диссертации долож. 1:

1. На юбилейной научно-технической конференции Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1972.

2. На семинарах по механике Днепропетровского отделения Института механики АН УССР, 1972, 1973.

3. На II-м симпозиуме "Колебания упругих конструкций с жидкостью", Новосибирск, 1973.

4. На симпозиуме "Проблемы моделирования динамики подвижного состава", Брянск, 1973.

5. На семинаре по механике Днепропетровского отделения Института механики и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1973.

БТ26744. Ротапринт ОЗ ДМетИ. Днепропетровск, 5, Лодманское шоссе, 36.

Заказ 637. Тираж 150. Объем 1 п.л. 0,7 уч.-издл.

Подписано к печати 17.IV.1974 г.