

Аспирант БЛОХИН Е. П.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЕЗДА
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ,
ВОЗНИКАЮЩИЕ В УПРЯЖНЫХ ПРИБОРАХ
ПРИ ТРОГАНИИ С МЕСТА**

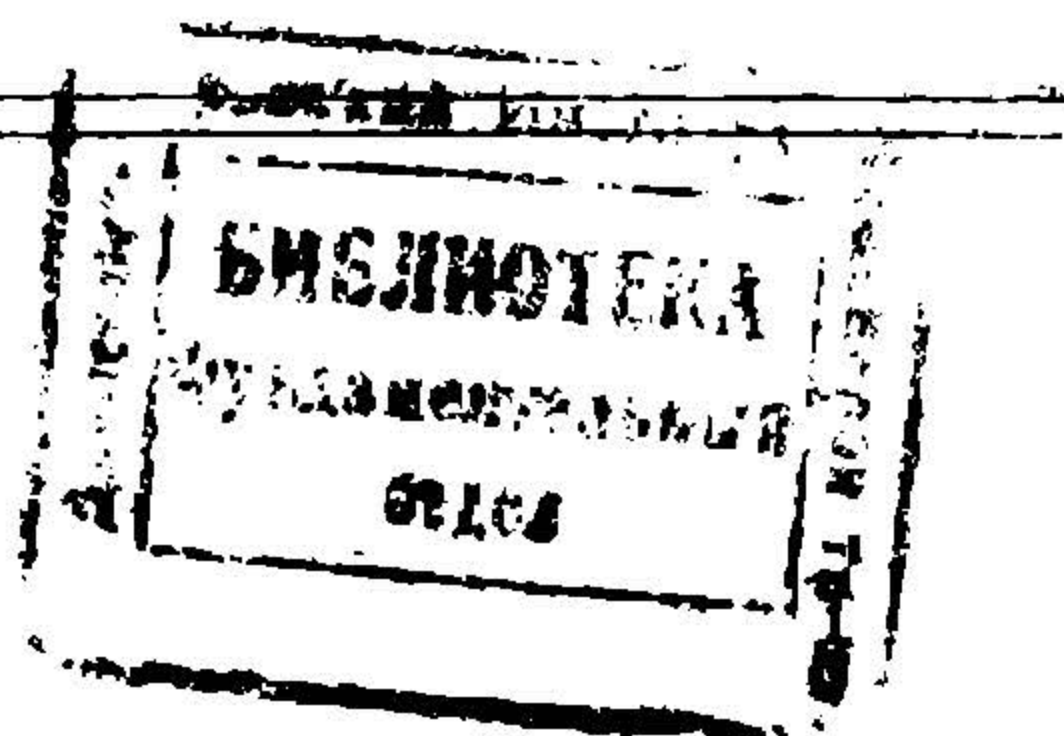
**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
профессор, доктор технических наук
В. А. ЛАЗАРЯН**

**ДНЕПРОПЕТРОВСК
1958 г.**

НТБ
ДНУЖТ

1238/02



С дальнейшим увеличением веса и скорости движения поездов все большее значение приобретает оценка усилий, возникающих в упряжных приборах подвижного состава при неустановившихся (переходных) режимах движения.

В настоящей работе рассматривается один из таких режимов: трогание с места предварительно растянутого (все зазоры в автосцепках устранены) неоднородного по массе поезда. Неоднородным будем именовать поезд, составленный из неотнотипных или однотипных, но различно загруженных вагонов.

Исследованием усилий, возникающих в упряжных приборах поездов при трогании с места занимались Резаль, Н. Е. Жуковский, А. М. Годыцкий-Цвирко, В. А. Лазарян, В. М. Мучников, А. У. Галеев, Т. Л. Городецкая, Б. Д. Лапкин и некоторые другие исследователи.

В подавляющем большинстве работ, посвященных продольной динамике подвижного состава, и в частности троганию состава с места, рассматриваются поезда, состоящие из однотипных и одинаково нагруженных вагонов, то есть однородные поезда.

Однако при существующих правилах, разрешающих формировать поезда без подбора вагонов по весу, составы могут включать в себя самые разнообразные комбинации большегрузных и малогрузных вагонов.

Поэтому исследование продольной динамики таких неоднородных поездов представляет не только теоретический, но и значительный практический интерес.

В отличие от выполненных ранее исследований ¹, ²) в реферируемой работе принято во внимание рассеивание механической энергии при колебаниях. Наряду с аналитическим решением задачи даны результаты опытов, проведенных как в натуре с реальными поездами, так и в лаборатории на элек-

¹) В. М. МУЧНИКОВ. Об усилиях, возникающих в сцепных приборах неоднородного поезда при трогании с места «Доклады Академии наук СССР», новая серия, том 68, № 6, 1949.

²) В. А. ЛАЗАРЯН и Б. Д. ЛАПКИН. Применение электрического моделирования к исследованию усилий, в упряжных приборах поездов, «Техника железных дорог», 1951, № 6.

1238/a

трической модели. С помощью электрической модели рассмотрены некоторые задачи по продольной динамике неоднородного поезда, решение которых аналитическим путем весьма затруднительно.

Первая глава работы посвящена аналитическому решению задачи о трогании с места поезда, состоящего из двух разнородных по массе частей.

В качестве расчетной схемы поезда принят упруго-вязкий неоднородный стержень с грузом на одном из концов (локомотив); дифференциальные уравнения движения при этом имеют следующий вид:

$$\frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial t^2} = a_1^2 \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial t^2} = a_2^2 \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial x^2}, \quad (1a)$$

где: $u^{(1)}(x, t)$ и $u^{(2)}(x, t)$ — перемещения сечений стержня соответственно на первом и втором участках;

x — координата, определяющая положение сечения стержня; начало координат помещено в месте сопряжения обоих участков; в качестве положительного направления оси принято направление в ту сторону, с которой находится груз P ;

t — время;

$$a_1^2 = \frac{k}{\rho_1} \quad \text{и} \quad a_2^2 = \frac{k}{\rho_2}; \quad k — \text{жесткость стержня, а } \rho_1 \text{ и}$$

ρ_2 — массы единиц длины участков стержня длиной l_1 и l_2 ;

μ — величина, характеризующая рассеивание энергии при колебаниях

Решения дифференциальных уравнений отыскивались при нулевых начальных и следующих граничных условиях и условиях сопряжения участков стержня.

Граничные условия.

На свободном конце стержня усилие должно равняться нулю в любой момент времени, следовательно,

$$\text{при } x = -l_1 \quad S^{(1)} = 0, \text{ т. е. } \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Условие на правом конце:

$$\text{при } x = l_2 \quad \frac{P}{g} \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial t^2} = F - k \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x}, \quad (3)$$

где F — внешняя сила, приложенная к грузу.

Условия сопряжения.

В точке сопряжения перемещения сечений обоих участков стержня должны быть равны между собой, следовательно,

$$\text{при } x = 0 \quad u^{(1)} = u^{(2)}; \quad (4)$$

но в точке сопряжения должны быть равны между собой и усилия обоих участков стержня, поэтому

$$\text{при } x = 0 \quad \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} = \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x} \quad (5)$$

Решение получено при помощи метода обобщенных координат. Выведены формулы для определения усилий в сечениях стержня при произвольном законе изменения силы $F(t)$, приложенной к грузу.

Специально рассмотрен случай действия на систему единичной силы, так как при этом сравнение теоретических расчетов, результатов моделирования и экспериментов в натуре особенно просто и наглядно. Полученные для этого случая рабочие формулы использованы для вычисления продольных динамических усилий, возникающих при трогании с места поезда, головная часть которого состоит из порожних, а хвостовая — из груженных вагонов. Чтобы в дальнейшем можно было сопоставлять усилия, полученные аналитически с усилиями, найденными экспериментально, рассмотрен состав, с которым производились опыты в реальных условиях. Вычисление усилий в шести сечениях поезда для различных моментов времени показало, что неоднородность поезда по массе приводит к увеличению продольных динамических усилий.

В первой главе приведено решение задачи для наиболее простого случая неоднородности, когда состав поезда состоит всего лишь из двух неоднородных частей. Принципиально аналитическое решение задачи возможно получить и в случае более высокой степени неоднородности состава. Однако при этом решение настолько осложняется математическими выкладками и громоздкими вычислениями, что доведение исследования до числовых результатов становится практически невыполнимым. В этих случаях неоценимую услугу оказывает метод электромеханических аналогий.

Вторая глава посвящена электрическому моделированию задачи и сопоставлению результатов моделирования с аналитическим решением.

Работы выполнялись на смонтированной в лаборатории института электрической модели, каждый из контуров, которой содержит индуктивность, емкость и сопротивления.

При моделировании задачи принималось во внимание рассеивание механической энергии при колебаниях. Моделью поезда являлась электрическая цепочка с омическими сопротивлениями, включенными последовательно с емкостями и индуктивностями. Электрические сопротивления определялись по следующим формулам, полученным В. А. Лазаряном на основании критериев подобия между механическими и электрическими величинами³⁾.

$$R_1 = \mu^1 \frac{n}{\lambda_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} - r_1 \frac{n^2}{\lambda_1^2}; \quad (6)$$

$$r_1 n = \mu^1 \frac{\lambda_1 \lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_k} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (7)$$

где: R_1 — сопротивление контура, включаемое последовательно с емкостью;

r_1 — сопротивление контура, включаемое последовательно с индуктивностью;

μ^1 — коэффициент, учитывающий рассеивание механической энергии при колебаниях и связанный с μ соотношением $\mu^1 = \mu \gamma_1$, где γ_1 — частота основного тона собственных свободных колебаний моделируемой механической системы;

n — число контуров, которыми моделируется механическая система;

λ_1 и λ_k — первое и k -тое собственные числа моделируемой механической задачи;

L_1 и C_1 — индуктивность и емкость контура.

Так как индуктивности контуров и собственные числа задачи на каждом из участков стержня отличны друг от друга, то формулы (6) и (7) нами применялись вначале отдельно для каждого участка. Определение собственных чисел задачи связано с громоздкими вычислениями, а в случае, когда стержень состоит из многих различных по массе или жесткости частей, практически невозможно. Это обстоятельство заставило специально исследовать вопрос о возможности моделирования неоднородных систем, для которых нахождение собственных чисел

3) Лазарян В. А. Электрическое моделирование переходных режимов движения стержней с упругими несовершенствами. Прикладная механика, т. 1, вып. 3, 1955.

сел весьма затруднительно. Было решено при определении электрических сопротивлений пользоваться собственными числами задачи, вычисленными для однородной системы, имеющей массу, равную массе неоднородной системы. Величина индуктивности, входящая в формулы (6) и (7), представлялась при этом как средняя для всего состава

$$(L_1)_{\text{ср.}} = \frac{L_1 m_1 + L_2 m_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}, \quad (8)$$

где: m_1 — количество вагонов одного типа;

m_2 — количество вагонов другого типа;

L_1 — индуктивность имитирующая массу вагона первого — типа;

L_2 — индуктивность, имитирующая массу вагона второго типа;

и т. д.

Результаты моделирования, выполненного при сопротивлениях, найденных:

1) по собственным числам задачи, вычисленным для каждого отдельного участка неоднородной системы и

2) по собственным числам задачи, вычисленным для однородной системы, имеющей массу, равную массе неоднородной системы, показали, что второй способ определения сопротивлений практически не приводит к искажению характера и величины усилий. Поэтому в дальнейшем электрические сопротивления находились по второму способу, позволяющему моделировать неоднородные системы при любой степени неоднородности.

Коэффициент ρ^1 , характеризующий рассеивание энергии в механической системе, был найден по сопротивлениям R_1 и r_1 , подобранным так, чтобы затухание колебаний в моделируемой механической и моделирующей электрической системах было одинаковым. Зависимость коэффициента ρ^1 от электрических сопротивлений устанавливалась следующей формулой:

$$\rho^1 = \frac{\lambda_1}{\pi} \sqrt{\frac{C_1}{(L_1)_{\text{ср.}}}} \left(R_1 + \frac{r_1 \pi^2}{\lambda_1^2} \right). \quad (9)$$

Входящее в эту формулу первое собственное число задачи представляет первый корень уравнения $\operatorname{tg} \lambda = -\alpha \lambda$, где α — отношение веса локомотива к весу состава.

Граничные условия для электрической модели подбирались в зависимости от граничных условий моделируемой механической задачи.

После установки электрических величин на модели включалось на вход скачкообразно изменяющееся напряжение — аналог силы тяги локомотива. Напряжения в сечениях модели — аналоги усилий в соответствующих сечениях поезда — регистрировались при помощи электронного осциллографа.

Моделирование задачи, решенной в первой главе, и сопоставление усилий, возникающих в упряжи однородных и неоднородных поездов, показало, что неоднородность состава по массе не только увеличивает продольные динамические усилия, но и существенно влияет как на характер изменения этих усилий во времени, так и на характер распределения наибольших сил по длине поезда. В рассмотренном нами примере увеличение усилий вследствие неоднородности составило 22%.

В заключительной части второй главы приведено сравнение напряжений в различных сечениях модели с усилиями в соответствующих сечениях поезда, вычисленными аналитически. Совпадение результатов моделирования с результатами аналитических расчетов вполне удовлетворительное. Отклонение не превышает 5%.

Сопоставление двух методов решения одной и той же задачи заставляет отдать предпочтение методу электрического моделирования, который не только избавляет от трудоемкой части исследования — математических вычислений, но и дает возможность вести осциллографическую регистрацию процессов во времени. При решении задач о переходных режимах движения неоднородных систем преимущества метода электрического моделирования особенно заметны.

Третья глава посвящена опытам по определению усилий в реальных неоднородных поездах, сопоставлению результатов натурных испытаний с результатами, полученными аналитически и путем моделирования, а также определению усилий, возникающих в упряжных приборах, при различных сочетаниях вагонов в составе.

Выполненные ранее многочисленные исследования однородных грузовых поездов показали, что отклонения измеренных в натуре усилий от их значений, вычисленных теоретически или полученных при помощи электрического моделирования, не выходят за пределы погрешностей, допускаемых в инженерной практике. Эти исследования полностью подтвердили возможность применения теории колебаний стержней и электрического моделирования к исследованию переходных процессов движения однородных грузов поездов⁴⁾.

⁴⁾ Лазарян В. А. О динамических усилиях, возникающих в упряжных приборах при трогании с места растянутых грузовых поездов. Труды ДИИТа, вып. 25, Трансжелдориздат, 1956.

Применимость теории колебаний стержней и электрического моделирования к исследованию переходных режимов движения неоднородных поездов не была настолько очевидна, чтобы не чувствовалась потребность в проведении опытов с реальными неоднородными поездами. Принимая во внимание это обстоятельство, а также то, что специальные опыты с неоднородными поездами в натуре не проводились ранее, были поставлены опыты по троганию с места предварительно растянутого неоднородного по массе поезда.

Опыты производились при тяге как одним, так и двумя электровозами серии ВЛ-22м. При трогании с места сила тяги локомотива нарастала очень быстро и оставалась далее почти постоянной.

Состав опытного поезда состоял из двух динамометрических сцепов, в каждый из которых входили 12 четырехосных полувагонов и 1 вагон — лаборатория. Вагоны головного сцепа были порожние, а хвостового — груженные. Исследования проводились с составом, который формировался по двум схемам, отличающимся только количеством входящих в них вагонов. При первой схеме состав включал 30, а при второй — 26 вагонов. Вес одного порожнего полувагона составлял 23,3 т, а вагона-лаборатории — 60 т.

При проведении опытов на пленках осциллографов установленных в вагонах-лабораториях, регистрировались следующие величины:

- 1) ток, протекающий через двигатели электровозов;
- 2) усилия в шести сечениях поезда;
- 3) перемещение поглощающего аппарата одного из вагонов лабораторий;
- 4) восьмые доли оборота колеса того же вагона;
- 5) время.

Измерение продольных усилий велось при помощи автосцепок, оборудованных проволочными датчиками. Для непосредственного определения усилий в одном из сечений поезда, была использована динамометрическая установка вагона-лаборатории № 42. Конструкция силомерной установки позволяла вести не только визуальные наблюдения натяжений и сжатий, но и регистрировать эти величины на ленте силомерного стола. Благодаря этому всегда можно было сопоставить и проверить масштабы записей.

Опыты с одинаковыми условиями повторялись не менее десяти раз.

В результате обработки опытных данных были построены графики распределения наибольших усилий по длине поезда. Характер распределения сил такой же как и в опытах, выполненных на электрической модели.

Сопоставление усилий, найденных аналитически с усилиями, полученными экспериментально, в натуре, позволило сделать заключение, что результаты теоретического исследования, выполненного в предположении, что неоднородный состав можно рассматривать как неоднородный упруго-вязкий стержень, хорошо согласуются с результатами опытов по троганию с места предварительно растянутого неоднородного поезда.

В заключительной части третьей главы с помощью электрической модели решены некоторые задачи, относящиеся к продольной динамике неоднородного поезда. Исследован вопрос о влиянии размещения неоднородных по массе вагонов на величину продольных динамических усилий. Наиболее невыгодным, с точки зрения усилий, оказалось такое размещение вагонов, при котором в головной части расположены группы более легких, а в средней или в хвостовой частях — группы более тяжелых вагонов; усилия в неоднородном поезде при этом на 25—30% больше, чем в однородном. Однако даже в тех случаях, когда в хвосте состава собраны все легковесные вагоны, усилия в неоднородном поезде все же превосходят на 10—15% те усилия, которые возникают в предварительно растянутом однородном поезде. Таким образом, при трогании с места неоднородных поездов усилия в упряжных приборах всегда больше, чем при трогании с места однородных поездов при одинаковой силе тяги локомотива. То или иное размещение вагонов в составе влияет не только на величину усилий, но и на характер изменения этих усилий во времени. Существенное влияние на усилия в упряжи оказывает также отношение веса одной части состава к весу другой неоднородной части состава.

ВЫВОДЫ:

1. Как электрическая модель, так и теоретические исследования, проводимые в предположении, что неоднородный состав без зазоров в упряжи — неоднородный упруго-вязкий стержень, хорошо отображают протекающий в реальных условиях процесс.

2. Электрическое моделирование в применении к задачам продольной динамики неоднородного поезда дает возможность легко и быстро, с практически вполне достаточной степенью точности, получить численные решения широкого круга задач. При этом имеется полная возможность пользоваться критериями подобия, установленными для однородных систем. Это обстоятельство особенно важно, когда состав поезда состоит из многих различных по массе участков, так как вычис-

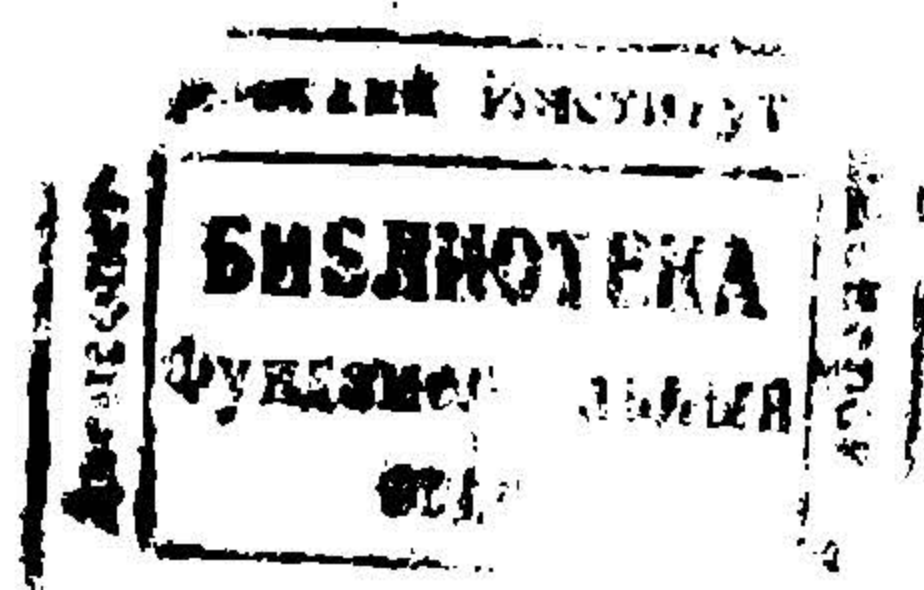
ление собственных чисел задачи, входящих в критерии подобия, при этом практически невозможно.

Решение сложных вопросов продольной динамики поезда, особенно вопросов переходных процессов движения неоднородных поездов, целесообразнее всего выполнять методом электрического моделирования.

3. Неоднородность состава по массе приводит, как правило, к увеличению продольных динамических усилий.

Существенное влияние на величину этих усилий оказывает размещение неоднородных вагонов в составе. Наиболее невыгодным с точки зрения усилий, является такое размещение вагонов, при котором головная часть поезда оказывается более легкой, чем хвостовая. В неоднородных поездах, сформированных таким образом, усилия на 25—30% превышают те усилия, которые возникают в однородном поезде при аналогичных условиях.

1238/a



Содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Блохин Е. П. О влиянии неоднородности поезда на динамические усилия, возникающие в упряжных приборах при трогании с места. Труды ДИИТ, выпуск XXVI. Трансжелдориздат, 1958.

2. Блохин Е. П. Электрическое моделирование продольных усилий, возникающих в неоднородных поездах при трогании с места. Труды ДИИТ, выпуск XXVI. Трансжелдориздат, 1958.