

На правах рукописи

Е 224.028.42

**БЛОХИН Е. П.**  
кандидат технических наук, доцент

46584

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ  
ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ  
С СУЩЕСТВЕННО НЕЛИНЕЙНЫМИ  
МЕЖДУВАГОННЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ**

(Диссертация написана на русском языке)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

(05.433 — подвижной состав и тяга поездов)

На правах рукописи

БЛОХИН Е. П.  
кандидат технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ  
ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ  
С СУЩЕСТВЕННО НЕЛИНЕЙНЫМИ  
МЕЖДУВАГОННЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

(Диссертация написана на русском языке)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

(05.433 — подвижной состав и тяга поездов)

4658  
в 8591

НТБ  
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный консультант Заслуженный деятель науки УССР, член-корреспондент АН УССР, доктор технических наук, профессор В. А. ЛАЗАРЯН.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор С. В. ВЕРШИНСКИЙ  
доктор технических наук, профессор С. М. КУЦЕНКО  
доктор технических наук, профессор Ф. В. ФЛОРИНСКИЙ

Ведущее предприятие (учреждение) — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Автореферат разослан « 31 » декабря 1971 г.

Защита состоится « . » 6 февраля 1972 г. на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г. Днепропетровск, 320010, ул. Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы просим направлять в двух экземплярах по адресу: г. Днепропетровск-320010, ул. Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта.

**Ученый секретарь Совета**  
доктор технических наук, профессор А. Е. БЕЛАН

НТБ  
ДНУЖТ

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану сказано, что увеличение пропускной и провозной способности железных дорог следует считать основным направлением в развитии железнодорожного транспорта страны.

Одним из основных способов увеличения провозной способности железных дорог является повышение веса грузовых поездов. В последнее время во многих странах намечается тенденция резкого увеличения грузоподъемности вагонов. Согласно данным Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ЦНИИ МПС), увеличение погонной нагрузки с 6 Т/м (шестиосный полувагон) до 8 Т/м (восьмиосный полувагон) снижает себестоимость перевозок на 5—6%. Использование большегрузных вагонов позволяет при той же длине станционных путей увеличить вес поезда, а следовательно, и провозную способность участка. При существующем парке вагонов достигается средний вес поезда 3500 Т в случае станционных путей длиной 850 м и — 4500 Т при длине путей 1050 м. Исследования, выполненные в ЦНИИ МПС, институте комплексных транспортных проблем и Московском институте инженеров железнодорожного транспорта, показывают, что при электрической и тепловозной тяге оптимальный вес поезда равен 5000—8000 Т. В перспективе на отдельных направлениях железных дорог технически необходимым и экономически целесообразным может оказаться вес поезда в два—три раза больший. Грузовые поезда, вес которых достигает нескольких десятков тысяч тонн, уже сейчас курсируют на дорогах СССР, США, Канады, Бразилии, Австрии, Швейцарии. Как правило, в таких поездах локомотивы сосредоточены вдоль состава, поэтому возникает проблема управления этими локомотивами.

С увеличением веса поезда обычно увеличиваются продольные усилия в нем. Наибольших значений эти усилия достигают

при переходных (неустановившихся) режимах, при которых система в сравнительно малые промежутки времени переходит из одного состояния в другое.

Даже при существующих весах поездов нередко наблюдаются случаи, когда продольные усилия, действующие на вагон, достигают значений опасных для прочности подвижного состава. Так, например, в 1954 г. было зарегистрировано 539 случаев разрыва хребтовых балок вагонов, а в декабре 1955 г. — 219. В 1968 г. на 13 дорогах страны произошло 225 обрывов автосцепок в поездах. Это вызывает необходимость изучения в каждом конкретном случае причин, порождающих указанные разрушения, и разработки мер по их предупреждению, для чего необходимы широкие теоретические и экспериментальные исследования переходных режимов движения поездов.

Исследованием переходных режимов движения поездов занимались Резаль, Н. Е. Жуковский, А. М. Годыцкий-Цвирко, В. А. Лазарян, С. А. Богомолов, М. М. Протодяконов, Ф. В. Флоринский, В. М. Мучников, С. В. Вершинский, Л. Н. Никольский, А. У. Галеев, В. М. Казаринов, Н. А. Панькин, С. В. Дувальян и другие.

Изучением неустановившихся режимов движения поездов особенно много занималась под руководством В. А. Лазаряна большая группа научных работников Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта: Б. Д. Лапкин, Т. Л. Городецкая, А. И. Стукалов, Е. П. Блохин, П. С. Бодянов, И. Г. Барбас, В. А. Каблуков, В. О. Гронский, Л. А. Манашкин, В. А. Музыкин, Л. В. Белик, Е. В. Юспина, А. В. Рыжов, Л. С. Бадикова.

В течение последних 15 лет ДИИТ и ЦНИИ МПС при участии, в некоторых случаях, Брянского института транспортного машиностроения и Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения проведены обширные экспериментальные исследования переходных режимов движения поездов. Большая часть этих работ проводилась под руководством и при непосредственном участии В. А. Лазаряна, С. В. Вершинского, Л. Н. Никольского, О. Г. Бойчевского, П. Т. Гребенюка, А. А. Львова. Некоторыми из этих исследований руководил автор представленной диссертации.

Во многих выполненных ранее работах, посвященных теоретическим методам исследования переходных режимов движения поездов, рассматриваются такие процессы, на которые

зазоры в упряжи влияния не оказывают, а междувагонные соединения, рассматриваются как упругие или упруго-вязкие связи. Указанные допущения дали возможность использовать теорию линейных дифференциальных уравнений, получить аналитические решения (в рядах и даже в замкнутой форме) и, в ряде случаев, детально изучить исследуемые процессы.

Однако зазоры в междувагонных соединениях часто оказывают существенное влияние на переходные режимы движения поездов. При этом задача исследования неустановившегося режима движения поезда становится существенно нелинейной. К таким задачам, например, относятся: пуск в ход полностью или частично сжатых и торможение с локомотива полностью или частично растянутых поездов, пуск в ход и торможение поездов с произвольным распределением зазоров в упряжи, движение через перелом продольного профиля пути все случаи движения грузового поезда, при которых возникают продольные усилия обоих знаков (растягивающие и сжимающие), а также все переходные режимы движения объединенных поездов, у которых локомотивы рассредоточены по составу. Во всех этих случаях продольные усилия имеют ударный характер и, как уже отмечалось, достигают, иногда, величин, опасных для прочности подвижного состава. Поэтому весьма актуальной является разработка способов расчета, позволяющих прогнозировать наиболее опасные режимы движения и определять еще на стадии проектирования возможные значения продольных усилий в поездах.

Математические соотношения, при помощи которых описывается исследуемый физический процесс, будем называть математической моделью этого процесса, а реализацию математической модели с помощью каких-либо вычислительных средств — математическим моделированием.

Цель диссертации состоит в разработке методики математического моделирования переходных режимов движения поездов с существенно нелинейными междувагонными связями при пуске в ход, торможении и движении по переломам продольного профиля пути, апробации этой методики путем сопоставления результатов расчета, выполненного при помощи численного интегрирования уравнений движения, с результатами аналитических решений и специальных опытов, проведенных в реальных условиях с обычными и длинносоставными грузовыми поездами, разработке способов определения по результатам специальных опытов параметров реальных сис-

тем и решении ряда задач, представляющих интерес в практике проектирования и эксплуатации подвижного состава.

В тех случаях, когда исследовались переходные режимы, зависящие от зазоров в упруги, поезд рассматривался как одномерная система деформируемых тел, соединенных амортизаторами (поглощающими аппаратами), а каждое тело (вагон или локомотив) упрощенно представлялось в виде сосредоточенной массы  $m_i$  и безынерционного деформируемого элемента.

Дифференциальные уравнения движения такой системы можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_i &= \frac{1}{m_i} (S_{i-1} - S_i + F_i) & (i = 1, 2, \dots, n); & (S_1 = S_n = 0), \\ \dot{q}_i &= v_i - v_{i+1} & (i = 1, 2, \dots, n-1), \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $v_i$  — абсолютная скорость движения  $i$  — того экипажа;  $q_i$  — относительное перемещение центров масс двух соседних экипажей;  $n$  — число экипажей в поезде;  $S_i$  — продольное усилие в  $i$ -том междувагонном соединении;  $F_i$  — силы, которые в зависимости от направления могут оказывать сопротивление или играть роль ускоряющих сил.

Систему уравнений (1) следует интегрировать при начальных условиях  $q_i = q_{i0}$  и  $v_i = v_{i0}$ .

В нашей стране, практически, весь подвижной состав железных дорог оборудован поглощающими аппаратами автоцепки фрикционного типа, поэтому в работе рассматриваются, в основном, амортизаторы именно этого типа.

В случае фрикционных амортизаторов функция  $S(q, q)$  неоднозначна. Если начальные значения  $q_{i0}$  находятся в пределах величины зазора, то решение уравнений (1) единственно для заданных  $q_{i0}$  и  $v_{i0}$ . Если начальные значения  $q_{i0}$  находятся в пределах зоны анкилозиса, то решение задачи будет неоднозначным, так как одному значению  $q_i$  соответствует множество значений  $S_i$ . Однозначное решение можно получить, если кроме обычных начальных условий задать дополнительные условия, например, начальные значения усилий  $S_i = S_{i0}$ . В общем случае уравнения (1) интегрировались при начальных условиях:

$$q_i(t_0) = q_{i0}; \quad v_i(t_0) = v_{i0}; \quad S_i(t_0) = S_{i0}. \quad (2)$$

Выполненные исследования показали, что при рассмотрении переходных режимов движения, на протекание которых

зазоры в упряжи влияния не оказывают, поезда, оборудованные поглощающими аппаратами типов Ш-1-Т, Ш-2-Т и ЦНИИ-Н6, можно рассматривать как линейные механические системы. Этот вывод распространяется и на поезда, оборудованные аппаратами типов Р-2П и Р-4П, если уровень силы тяги при пуске в ход значительно превышает величину усилия начальной затяжки амортизаторов. Таким образом, при решении целого ряда задач протекающие явления можно описать с помощью линейных дифференциальных уравнений и получить аналитические выражения для определения усилий в сечениях поезда в каждый момент времени. К таким задачам относятся, практически, все случаи движения современных пассажирских поездов, в междугонных соединениях которых зазоры малы, пуск в ход предварительно растянутого грузового поезда, торможение с локомотива предварительно сжатого поезда в интервале времени, соответствующем распространению вдоль состава волны сжимающих усилий, и некоторые другие.

То обстоятельство, что в ряде случаев поезд можно рассматривать как линейную систему, позволило предложить ряд способов определения по результатам специальных опытов численных значений параметров, характеризующих упругие и неупругие свойства системы.

Несмотря на нестабильность в работе существующих поглощающих аппаратов автосцепки и в связи с этим большое отличие индивидуальных характеристик даже однотипных междугонных соединений, оказалось возможным по характеру распространения возмущений выявить общие, интегральные свойства всей системы, проявляющиеся при переходном процессе. Именно так для поездов, оборудованных поглощающими аппаратами автосцепки типов Ш-1-Т, Ш-2-Т, ЦНИИ-Н6, Р-2П и Р-4П были определены жесткости конструкции вагона, поглощающего аппарата, системы «конструкция — амортизатор», величина необратимо поглощаемой энергии, величина начальной затяжки амортизатора. Совпадение значений параметров, полученных совершенно разными способами, подтверждает правильность предложенных методик обработки натуральных осциллограмм.

В тех случаях, когда рассматриваются переходные режимы, не зависящие от зазоров в упряжи, аналитические исследования удобно проводить с использованием расчетных схем, позволяющих свести задачу к решению одного или несколь-

ких уравнений с частными производными при заданных дополнительных условиях. При этом весьма эффективным является применение метода обобщенных координат.

С помощью этого метода в работе рассмотрены переходные режимы движения механической системы, состоящей из трех жестких тел (грузов)  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ , соединенных между собой с помощью двух отличающихся плотностью и жесткостью упруго-вязких стержней так, что центры тяжести тел и оси обоих стержней лежат на одной прямой. В тех случаях, когда зазоры в упряжи отсутствуют такая система может быть принята в качестве расчетной схемы поезда, сформированного из двух железнодорожных составов и трех рассредоточенных локомотивов. С помощью операционного метода были найдены реакции системы на силы  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  и  $F_3(t)$ , приложенные к соответствующим грузам  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  вдоль прямой, проходящей через центры тяжести грузов и стержней. Получены реакции системы на единичные силы и силы, изменяющиеся по экспоненциальному закону. Для случая  $P_2=P_3=0$ ,  $F_2=F_3=0$  и  $F_1 = \sigma_0(t)$ , где  $\sigma_0(t)$  — единичная функция, построены осциллограммы усилий в шести сечениях стержня, состоящего из двух неоднородных участков. Сопоставление усилий, найденных аналитически, с усилиями, полученными экспериментально, при проведении в реальных условиях специальных опытов, показало, что при пуске в ход предварительно растянутого неоднородного поезда состав его можно рассматривать как неоднородный упруго-вязкий стержень.

При аналитических исследованиях переходных режимов движения поездов получение в каждый момент времени численного результата связано с громоздкими вычислениями. Эти вычисления становятся еще более громоздкими в случае неоднородных поездов. Если количество неоднородных участков велико, аналитическое решение задачи значительно усложняется. В этом случае целесообразно использовать электрические модели.

С помощью электрической модели, построенной по первой системе электромеханических аналогий, исследовались усилия, возникающие при пуске в ход неоднородных поездов без зазоров в упряжи. Необходимость определения усилий в поездах, сформированных из большого числа групп неоднотипных и неодинаково загруженных вагонов, заставила специально исследовать вопрос о возможности использования при этом критериев подобия, установленных для однородных систем.

Это обстоятельство особенно важно, так как вычисление собственных чисел задачи, входящих в критерии подобия, затруднительно. С помощью этой модели изучалось в какой мере неодновременность приложения силы тяги головным локомотивом и толкачом влияет на продольные динамические усилия, исследовался пуск в ход поездов, составленных из одинаково и неодинаково нагруженных вагонов с подвижными хребтовыми балками и было начато исследование пуска в ход предварительно сжатых поездов. При этом удалось получить некоторые, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом решения, однако настройка электронной схемы зазора оказалась достаточно сложной и требовала высокой квалификации экспериментатора.

Переходные режимы движения поездов с нелинейными междувагонными соединениями более детально исследовались при помощи специализированной электронной модели, выполненной на базе трех АВМ типа МПТ-9. С помощью структурных моделей изучался пуск в ход предварительно сжатых поездов, сформированных из обычных вагонов и вагонов с подвижными хребтовыми балками, решалась задача о влиянии нелинейных упруго-вязких и упруго-фрикционных силовых характеристик амортизаторов на переходный режим, исследовалось торможение поезда. Использование указанной модели позволило определить оптимальное значение необратимого поглощения энергии упруго-фрикционными амортизаторами при пуске в ход предварительно сжатого состава. При этом в качестве критерия оптимальности принималось средне-квадратичное отклонение мгновенных значений усилий от значений усилий при стационарном режиме (равномерно-ускоренном движении состава).

Приемлемая для практических целей точность решения, относительная простота моделей, возможность оперативного варьирования параметров исследуемого объекта и выбора в процессе решения стратегии исследования, наглядность полученных результатов и малое время решения задачи позволяют с успехом использовать электронные модели для решения нелинейных задач о переходных режимах движения в тех случаях, когда поезд может быть представлен механической системой, состоящей из сравнительно небольшого числа масс (примерно, тридцати). Современные поезда весом 8—10 тысяч тонн состоят из 100 и более вагонов. Увеличение числа масс при решении задачи на АВМ связано с увеличением числа

блоков операционных усилителей, а следовательно, с большими трудностями по обеспечению устойчивой работы сложных электрических цепей. В этих случаях исследование целесообразно проводить на ЭЦВМ, используя численные методы интегрирования уравнений (1), описывающих неустановившийся процесс.

Путем сопоставления результатов численных и аналитических решений задач о пуске в ход, торможении и движении поезда по перелому продольного профиля пути показано, что погрешность вычислений, которая помимо погрешности самого численного метода включает в себя погрешность, полученную в результате выполнения на ЭЦВМ большого числа арифметических операций, не превышает допустимую.

С учетом времени, затрачиваемого на вычисления, и необходимого объема оперативной памяти, а также устойчивости численных методов к изменению шага интегрирования, произведен выбор метода численного решения задачи. Сопоставление результатов расчета усилий, найденных с помощью методов Рунге-Кутты четвертого и второго порядков, а также путем непосредственного использования формул Тэйлора с результатами, полученными аналитическим путем для линейных систем и экспериментальным для реальных поездов с зазорами в упряжи, показало, что уравнения (1) целесообразно интегрировать с помощью формул Тэйлора, принимая порядок старшей производной равным двум. Шаг интегрирования можно выбирать равным 0,01 сек., если зазоры в упряжи не оказывают влияния на переходный режим движения, или 0,005 сек. — в противном случае.

Результаты расчетов сопоставлялись с результатами специальных опытов по пуску в ход и экстренному торможению с локомотива однородных и неоднородных поездов, вагоны которых были оборудованы фрикционными поглощающими аппаратами различных конструкций. Рассматривались переходные режимы, не зависящие от зазоров в упряжи (пуск в ход предварительно растянутого и торможение сжатого поездов) и режимы, на протекание которых зазоры в упряжи оказывают влияние (пуск в ход предварительно сжатого и торможение растянутого поездов). Расчеты производились с использованием численных значений параметров реальной системы, найденных по результатам специальных опытов. Показано, что при полной информации о состоянии механической системы к началу переходного процесса, т. е. в том случае, когда

известны начальные значения  $q_{10}$ ,  $v_{10}$ ,  $S_{10}$ , можно получить решения, достаточно хорошо согласующиеся с результатами опытов, выполненных в реальных условиях.

Моделирование переходных режимов движения длинносоставных поездов, особенно таких, у которых локомотивы рассредоточены, связано с интегрированием системы нелинейных дифференциальных уравнений достаточно высокого порядка. С увеличением порядка системы увеличивается количество операций, выполняемых на одном шаге, участок интегрирования, а следовательно, и общее количество операций. При этом не исключается, что только за счет выполнения большого числа арифметических операций может быть накоплена погрешность, существенно искажающая количественную и качественную стороны исследуемого процесса. Поэтому сопоставление результатов численного решения задачи с результатами опытов, выполненных в реальных условиях с длинносоставными грузовыми поездами представляет особый интерес. Такое сопоставление проведено для случаев пуска в ход предварительно сжатых объединенных неоднородных поездов, сформированных в одном случае из двух локомотивов и 87 вагонов, а в другом — из трех рассредоточенных по составу локомотивов и 147 вагонов. Сопоставление показало, что результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами опытов даже в том случае, когда порядок дифференциальных уравнений (1) равен 300.

Пуск поезда в ход исследован при силе тяги, приложенной мгновенно или изменяющейся ступенями. В большинстве случаев сила тяги локомотива (локомотивов) считалась изменяющейся по экспоненциальному закону

$$F = F_0 (1 - e^{-\gamma t}) \quad (3)$$

при различных значениях параметра  $\gamma$ .

Предполагалось, что при экстренном торможении на экипаж, включенный в поезд, действует сила

$$F_i(t - \tau_i, v_i) = -T(t - \tau_i) V(|v_i|) \sigma_0(t - \tau_i) \text{Sign } v_i \quad (i = 1, 2, \dots, n); \quad (4)$$

$$V(|v_i|) = \frac{|v_i| + 100}{5|v_i| + 100}; \quad T(t - \tau_i) = CK_i \frac{16K_i + 100}{80K_i + 100}$$

где:  $\tau_i$  — время запаздывания сил  $F_i$  ( $i = 2, \dots, n$ ) по отношению к силе  $F_1$ ;  $C$  — постоянная, зависящая от числа тормозных колодок и материала их;  $K_i = K_{i0} [1 - \exp(-\gamma_i(t - \tau_i))]$  — сила нажатия на одну колодку в  $T$ .

В случае движения поезда на выбеге по перелому продольного профиля пути сила  $F_1$  принималась равной составляющей силы тяжести  $i$  — того экипажа.

Многие используемые при расчетах исходные данные находят экспериментальным путем и, естественно, имеют определенную погрешность. Поэтому специально исследовалось в какой мере те или иные параметры системы, не оказывая существенного влияния на переходный режим движения поезда, усложняют алгоритм и процесс вычислений и возможно ли пренебречь некоторыми из них и упростить математическую модель исследуемого режима, не снижая практически точности результатов.

С этой целью изучалось влияние на продольные усилия в поезде величины начальной затяжки амортизаторов междувагонных соединений и жесткости их, вязкого сопротивления и функции, с помощью которой можно учесть влияние скорости скольжения на коэффициент трения трущихся поверхностей поглощающих аппаратов, величины зазоров в упряжи, числа масс в системе, сил сопротивления поступательному движению экипажей, интенсивности нарастания тормозной силы и скорости распространения тормозной волны при пневматическом управлении тормозами. Оказалось, что можно пренебречь влиянием на переходный режим сил сопротивления поступательному движению экипажей и начальной затяжки амортизаторов, считать силовую характеристику на участках нагружения и разгрузки линейной, а усилие  $S_1$  вычислять так:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq |q_i| \leq \delta; \\ & \text{при } \delta < |q_i| < \bar{\Delta} + \delta \text{ и } q_i \dot{q}_i \geq 0: \\ k_n(q_i - \delta), & \text{если } |k_n(q_i - \delta)| \leq |k_k(q_i - \bar{q}_{pi}) + k_p(\bar{q}_{pi} - \delta)|; \\ & k_k(q_i - \bar{q}_{pi}) + k_p(\bar{q}_{pi} - \delta) + \beta' \dot{q}_i, \\ & \text{если } |k_n(q_i - \delta)| > |k_k(q_i - \bar{q}_{pi}) + k_p(\bar{q}_{pi} - \delta)|; \\ & \text{при } \delta < |q_i| < \bar{\Delta} + \delta \text{ и } q_i \dot{q}_i < 0: \\ k_p(q_i - \delta), & \text{если } |k_p(q_i - \delta)| > |k_k(q_i - \bar{q}_{ni}) + k_n(\bar{q}_{ni} - \delta)|; \\ & k_k(q_i - \bar{q}_{ni}) + k_n(\bar{q}_{ni} - \delta) + \beta' \dot{q}_i, \\ & \text{если } |k_p(q_i - \delta)| \leq |k_k(q_i - \bar{q}_{ni}) + k_n(\bar{q}_{ni} - \delta)|; \\ \text{при } \frac{k_k \bar{\Delta} - S_{ан}}{k_k - k_p} \leq |q_i - \delta| \leq \bar{\Delta} \text{ и } q_i \dot{q}_i < 0 \text{ или } |q_i - \delta| > \bar{\Delta}. \\ & k_k(q_i - \bar{\Delta} - \delta) + S_{ан} + \beta' \dot{q}_i, \end{cases} \quad (5).$$

где:  $\delta$  — зазор;  $S_{ан}$  — усилие, при котором амортизатор исчерпывает возможность деформироваться;  $\Delta$  — величина полного сжатия амортизатора;  $\beta'$  — коэффициент вязкости;  $k_n$ ,  $k_p$  — жесткости соединения при нагрузке и разгрузке;  $k_k$  — продольная жесткость конструкции вагона;  $q_{н1}$ ,  $q_{р1}$  — значения  $q_1$  в моменты изменения знака произведения  $q_1 q_1$  с «плюса» на «минус» и наоборот.

Выражение (5) позволяет учитывать зависимость рассеивания энергии в поглощающих аппаратах от скорости скольжения трущихся поверхностей и компенсирующее, на участке нагружения силовой характеристики, влияние вязкого сопротивления движению.

Рассмотренные упрощения математической модели позволяют, не снижая точности результатов, существенно сократить машинное время при решении задач на ЭЦВМ, а при использовании АВМ — уменьшить и, в ряде случаев, упростить оборудование.

Сопоставление усилий, полученных путем расчета и электронного моделирования, с усилиями, найденными экспериментально, показывает, что предлагаемые математические модели достаточно хорошо не только качественно, но и количественно отображают процессы, протекающие в реальных условиях при пуске в ход и экстренном торможении обычных однородных и неоднородных поездов, а также длинносоставных объединенных поездов, у которых локомотивы находятся не только в голове, но и внутри состава.

К началу переходного процесса распределение зазоров в упряжи обычно не известно и, как правило, является случайным. Поэтому специально исследовался вопрос о влиянии случайного распределения зазоров вдоль длины состава на усилия, возникающие при пуске в ход предварительно сжатого поезда. Предполагалось, что величины зазоров в междувагонных соединениях подчиняются нормальному закону распределения и могут изменяться в довольно широком диапазоне (от 13 до 130 мм). Расчеты усилий, выполненные для 21 варианта случайного распределения зазоров показали, что больше всего (иногда в 1,6 раза) изменяется усилие в головном сечении поезда. Изменяется также характер осциллограмм продольных усилий, однако наибольшее значение усилия в поезде изменяется всего лишь на 15%. Кроме того, результаты опытов по пуску в ход предварительно сжатого поезда достаточно хорошо

согласуются с результатами численного решения задачи, выполненного в предположении, что зазоры в упряжи одинаковы и равны среднему значению. Поэтому, в большинстве случаев, при расчетах и моделировании предполагалось, что зазоры в междвагонных соединениях распределены вдоль длины состава равномерно. Такое предположение значительно упрощает задачу и позволяет освободить группу рабочих ячеек в оперативной памяти ЭЦВМ или сократить оборудование АВМ.

Исследования, выполненные в реальных условиях и с помощью математических машин в лаборатории, показывают, что при быстром нарастании силы тяги число вагонов в поезде, практически, не влияет на переходный процесс, вызванный пуском в ход. Поэтому пуск поезда в ход можно изучать на системах, включающих небольшое число масс.

В случае распространяющегося вдоль длины системы возмущения (торможение поезда, движение его по переломам продольного профиля пути) длина состава существенно влияет на величины продольных усилий. Так, при экстренном торможении поезда с зазорами в упряжи увеличение длины состава в 3 раза повышает наибольшее значение сжимающего усилия в 3—4 раза, а с увеличением длины состава в 6 раз это усилие увеличивается, примерно, в 9 раз. Поэтому при исследовании торможений, осуществляемых с помощью тормозных средств состава, число масс в расчетной схеме и реальной системе должно быть одинаковым. Это в известной мере ограничивает применение электронных моделей к решению задач о торможении длинносоставных поездов и движении их по переломам продольного профиля пути.

Во всех выполненных ранее исследованиях торможений поездов использовались упрощенные математические описания тормозных сил. В одних случаях принималось, что  $T(t - \tau_1) = F_0 = \text{Const}$ , а в других  $T(t - \tau_1) = F_0[1 - \exp(-\gamma_i(t - \tau_1))]$ . При этом предполагалось, что  $V(|v_1|) = 1$ . В случае моделирования торможения поезда с помощью АВМ тормозная сила давалась в виде  $F_1 = \tilde{T}_1 + \tilde{V}_1$ , где функции  $\tilde{T}_1$  и  $\tilde{V}_1$  подбирались такими, чтобы наибольшее усилие при  $\delta \neq 0$  и тормозной путь при моделировании соответствовали значениям, полученным в опытных поездках с таким же поездом.

Вычисление тормозных сил непосредственно по формулам (4) позволило оценить погрешность, связанную со всеми упо-

мянутыми выше упрощениями. Был рассмотрен, также случай, когда

$$V(|v_i|) = \frac{1}{v_0} \int_0^{v_0} \frac{v + 100}{5v + 100};$$

$$T(t - \tau_i) = F_0[1 - \exp(-\gamma_i(t - \tau_i))], \quad (6)$$

где  $v_0$  — начальная скорость торможения.

Продольные усилия и тормозные пути определялись для поездов, в составах которых было 32; 64; 96 вагонов. В одних случаях зазор в упряжи принимался равным среднему измеренному в опытах значению, а в других — нулю.

Если усилия в поезде и тормозные пути, найденные с использованием формул (4), считать точными, то оказывается, например, что при  $V(|v_i|) = 1$  и  $T(t - \tau_i) = F_0[1 - \exp(-\gamma_i(t - \tau_i))]$  погрешность в определении наибольших значений усилий достигает 50%, а в определении тормозных путей — 15%; при этом удается на 20—30% уменьшить время, затрачиваемое на решение задачи с помощью ЭЦВМ. Если тормозные силы вычислять по формулам (6), то погрешность в определении наибольших значений сжимающих усилий не превышает 10%, а тормозных путей — 3%; при этом затраты машинного времени уменьшаются на 10—15%. Поэтому при ориентировочных оценках усилий, возникающих в поезде при экстренном торможении, можно, с целью уменьшения времени, затрачиваемого на проведение расчетов, или с целью упрощения блоков, моделирующих тормозные силы (в случае использования АВМ) пользоваться формулами (6).

Существующие правила формирования грузовых поездов позволяют включать в состав вагоны без подбора их по весу, поэтому очень часто железнодорожные поезда оказываются неоднородными. С использованием математических машин исследованы не рассматривавшиеся ранее переходные режимы движения неоднородных поездов с зазорами в упряжи при пуске в ход и экстренном торможении. Рассмотрены различные схемы размещения неоднородных вагонов в составе поезда и различные соотношения масс вагонов. При пуске поезда в ход варьировался уровень силы тяги, а при торможении — скорость движения. Влияние неоднородности оцене-

но — коэффициентом неоднородности — отношением наибольшего значения усилия в неоднородном поезде к наибольшему значению усилия в однородном поезде, найденному в идентичных условиях. Показано, что размещение неоднородных вагонов в составе существенно влияет на продольные усилия, возникающие при пуске в ход и торможении. Это влияние особенно заметно, когда переходный процесс зависит от зазоров в упряжи. Так, при пуске в ход предварительно растянутого поезда коэффициент неоднородности может достигать значения 1,3, а при пуске в ход сжатого поезда — 1,7.

Как уже отмечалось, в последние годы в нашей стране и за рубежом наблюдается тенденция эксплуатации на отдельных направлениях железных дорог тяжеловесных грузовых поездов с рассредоточенными локомотивами. Пуск в ход, ведение по перегону и торможение такого поезда связано с известными трудностями, возрастающими особенно в тех случаях, когда каждым локомотивом управляет машинист. В настоящее время на ряде зарубежных железных дорог внедряется несколько систем управления вспомогательными локомотивами. Одни из них построены на принципе дистанционного управления с использованием радиосвязи, или контактной сети в качестве канала связи для передачи команд с головного локомотива на вспомогательный. У других — для регулирования мощности вспомогательного локомотива используются сигналы от тензодатчиков, расположенных на автосцепках, и тахогенераторов, установленных на осях колесных пар. В Московском институте инженеров железнодорожного транспорта разрабатывается система дистанционного управления. В лаборатории динамики и прочности подвижного состава ДИИТа под руководством автора разрабатывается система управления вспомогательными локомотивами, представляющая собой систему автоматического регулирования с жесткой адаптацией. Изготовленный в ДИИТе опытный образец системы автоматического управления тягой вспомогательного локомотива был испытан совместно с Приднепровской железной дорогой в эксплуатационных условиях на базе проходящих по участку объединенных поездов весом до 7000 Т. В октябре 1971 г. выполнено 15 поездов, в которых управление тягой находящегося в середине состава электровоза ВЛ-22М осуществлялось автоматически указанной системой, а торможение поезда обеспечивалось разработанной в ЦНИИ МПС системой пневматической синхронизации. Проведенные испы-

тания подтвердили работоспособность предлагаемой системы управления.

Ответ на вопрос о том, как расставить в кольцевом маршрутном поезде локомотивы, и как наиболее целесообразно управлять движением объединенного поезда, из каких принципов лучше исходить при разработке систем управления (диспетчерское или автономное) и по какому основному параметру следует регулировать работу системы автоматического управления вспомогательными локомотивами, чтобы при надежной работе всех узлов ее обеспечивались простота исполнения, наладки и эксплуатации, а главное — безопасное движение поезда, можно дать лишь после тщательных исследований переходных режимов движения таких поездов при пуске в ход, торможении, движении по переломам продольного профиля пути. Эти исследования прежде всего надо проводить в лабораторных условиях с использованием математических машин.

В работе с помощью ЭЦВМ исследованы не рассматривавшиеся ранее переходные режимы движения сдвоенных и строенных объединенных поездов. Рассмотрено торможение этих поездов. Изучено влияние рассредоточения локомотивов и неодновременного включения силы тяги этих локомотивов на продольные усилия при пуске поездов в ход. Результаты расчетов сопоставлены с результатами опытов с объединенными поездами, проведенных на экспериментальном кольце ЦНИИ МПС и в эксплуатационных условиях Приднепровской железной дороги.

Расчеты показателей прочностной надежности элементов конструкций основаны, как известно, на анализе статистических распределений нагрузки и прочности. Получение этих распределений является наиболее трудоемкой частью всего расчета. Оценка статистического распределения продольных усилий в грузовых поездах осложняется спецификой их эксплуатации, затрудняющей измерение в течение продолжительного промежутка времени сил, действующих на экипаж. В работе приведены некоторые результаты статистической обработки осциллограмм продольных усилий, зарегистрированных в грузовых однородных поездах весом 2340—10000 Т и неоднородных — весом 10000 Т при проведении многочисленных экспериментов, выполненных совместно ДИИТ и ЦНИИ МПС в период с 1955 г. по 1970 г. Из переходных режимов выбраны только пуск в ход и торможения (экстренные

и полные служебные с локомотива). Опыты проводились в зимнее и летнее время года, в эксплуатационных условиях Приднепровской железной дороги и на экспериментальном кольце, при тяге двумя и тремя локомотивами. Особенностью приведенных результатов опытов с однородными поездами является их соответствие действительным условиям эксплуатации, так как к анализу привлекались лишь случаи пуска и торможения, соответствующие эксплуатационным условиям. Пуск в ход и торможение осуществлялось по усмотрению машинистов. Случаи искусственно сжатых или растянутых поездов, частично сжатых, частично заторможенных и т. д. во внимание не принимались. Приведенные статистические распределения могут быть использованы при построении суммарного распределения продольных усилий, учитывающего все поездные режимы, и оценки прочностной надежности элементов конструкции вагона.

## ВЫВОДЫ

1. В работе показано, что предложенные математические модели достаточно хорошо отображают процессы, протекающие в реальных условиях при пуске в ход и экстренном торможении обычных однородных и неоднородных поездов, а также объединенных поездов, у которых локомотивы находятся не только в голове, но и внутри состава.

2. Исследования показали, что при рассмотрении переходных режимов движения, на протекание которых зазоры в упряжи влияния не оказывают, поезда, оборудованные поглощающими аппаратами типов Ш-1-Т, Ш-2-Т и ЦНИИ-Н6 можно рассматривать как линейные механические системы. Этот вывод распространяется и на поезда, оборудованные аппаратами типов Р-2П и Р-4П, если уровень силы тяги при пуске в ход значительно превышает величину усилия начальной затяжки амортизаторов.

Сопоставление усилий, найденных аналитически, с усилиями, полученными экспериментально, показывает, что при пуске в ход предварительно растянутого неоднородного поезда состав его можно рассматривать как неоднородный упруго-вязкий стержень. Если количество неоднородных участков такого стержня велико, аналитическое решение задачи

значительно усложняется. В этом случае целесообразно использовать электрические модели.

3. Опыт применения электрических моделей показал, что, исследуя переходный процесс движения неоднородного поезда, можно использовать критерии подобия, установленные для однородных систем. Это обстоятельство особенно важно, так как в случае системы с большим числом неоднородных включений, вычисление собственных чисел задачи, входящих в критерии подобия, затруднительно.

4. То обстоятельство, что в ряде случаев поезд можно рассматривать как линейную систему, позволило предложить ряд способов определения по результатам специальных опытов численных значений параметров, характеризующих упругие и неупругие свойства системы. Совпадение значений параметров, полученных совершенно разными способами, подтверждает правильность предложенных методик обработки натуральных осциллограмм.

5. Во многих случаях зазоры в междувагонных соединениях оказывают существенное влияние на переходные режимы движения поездов. Предложенные методики математического моделирования позволяют исследовать при помощи математических машин неустановившиеся режимы движения поездов с существенно нелинейными междувагонными соединениями при пуске в ход, торможении и движении по переломам продольного профиля пути.

6. К началу переходного режима распределение зазоров в упряжи, как правило, является случайным. Однако исследования показывают, что при определении наибольшего значения усилий, возникающих в поезде при переходных режимах движения, зазоры в упряжи можно считать равномерно распределенными вдоль длины состава. Такое предположение значительно упрощает задачу и позволяет освободить группу рабочих ячеек в оперативной памяти ЭЦВМ или сократить оборудование АВМ.

7. Исследования, выполненные в реальных условиях и с помощью математических машин в лаборатории, показывают, что пуск поезда в ход можно изучать на системах, включающих небольшое число масс.

В случае распространяющегося вдоль длины системы возмущения (торможение поезда, движение его по переломам продольного профиля пути) длина состава существенно влияет на величины продольных усилий. Поэтому при исследо-

вании торможений, осуществляемых с помощью тормозных средств состава, число масс в расчетной схеме и реальной системе должно быть одинаковым.

8. Многолетний опыт применения электронных моделей и цифровых вычислительных машин показывает, что исследование переходных режимов движения длинносоставных поездов, особенно при торможении и движении их по переломам продольного профиля пути, следует проводить на ЭЦВМ, используя численные методы интегрирования уравнений, описывающих неустановившийся процесс. При этом уравнения (1) целесообразно интегрировать с помощью формул Тэйлора, принимая порядок старшей производной равным двум.

9. С помощью ЭЦВМ исследовано влияние на продольные усилия величины начальной затяжки амортизаторов междувагонных соединений и жесткости их, вязкого сопротивления и функции, с помощью которой можно учесть влияние скорости скольжения на коэффициент трения трущихся поверхностей поглощающих аппаратов автосцепки, величины зазоров в упряжи, числа масс в системе, сил сопротивления поступательному движению экипажей, интенсивности нарастания тормозной силы и скорости распространения тормозной волны при пневматическом управлении тормозами. Оказалось, что можно упростить, в ряде случаев, математическую модель исследуемого процесса. Предложенные упрощения математической модели позволяют, не снижая точности результатов, существенно сократить машинное время при решении задач на ЭЦВМ, а при использовании АВМ — уменьшить и, в ряде случаев, упростить оборудование.

10. Во всех выполненных ранее исследованиях экстренных торможений поездов математическое описание тормозных сил (см. формулы (4)) использовалось в упрощенном виде. Вычисление тормозных сил непосредственно по формулам (4) дало возможность оценить связанную с этим погрешность в расчетах. При ориентировочных оценках усилий, возникающих в поезде при экстренном торможении, и дефиците времени, затрачиваемого на проведение расчетов, или с целью упрощения специальных блоков, моделирующих тормозные силы (в случае использования АВМ), можно пользоваться формулами (6).

11. Неоднородность состава оказывает существенное влияние на усилия, возникающие в поезде при пуске в ход и торможении. Это влияние особенно заметно, когда переходный процесс зависит от зазоров в упряжи. Только за счет неодно-

родности продольные усилия могут увеличиваться в 1,7 раза.

12. Выполненные исследования показывают, что в длинно-составных поездах рассредоточение локомотивов позволяет существенно (иногда на 50—70%) уменьшить продольные динамические усилия при пуске в ход.

Неодновременное включение тяговых двигателей локомотивов рассредоточенных по составу, существенно влияет на переходный процесс, вызванный пуском поезда в ход. Наиболее целесообразным является одновременное включение двигателей.

При включении локомотивов «по волне возмущений» продольные усилия увеличиваются (иногда в 1,5—2 раза), но остаются значительно меньше тех значений, которые опасны для прочности подвижного состава. Поэтому при разработке систем управления тяговыми двигателями вспомогательных локомотивов объединенных поездов можно не принимать во внимание отмеченный рост усилий, отдавая предпочтение надежности работы всех узлов системы управления, простоте исполнения, наладки и эксплуатации.

В случае пневматического управления тормозами объединенного поезда, безусловно, целесообразным является одновременное включение тормозных средств локомотивов. При неодновременном (с запаздыванием) включении тормозных средств локомотивов наибольшие значения усилий, возникающих в поезде при экстренном торможении, могут увеличиваться иногда в 5—6 раз.

13. Расчеты, выполненные с помощью ЭЦВМ, и опыты показывают, что при торможении длинносоставных поездов и, особенно, объединенных поездов с разобщенными тормозными магистралями, возможны ситуации, близкие к стационарным режимам движения, когда продольные сжимающие усилия в соседних сечениях состава достигают значительных (до 150 Т) величин, практически, одновременно и действуют в течение длительных промежутков времени. В таких условиях может быть не обеспечена безопасность движения вагонов по устойчивости от схода с рельсов.

В случае торможения (даже регулировочного) объединенных поездов, у которых в составе имеются неполностью загруженные четырехосные вагоны, включение тормозов только первой части состава следует допускать лишь в исключительных случаях. Поэтому появляется необходимость пересмотра пункта 24 Временной инструкции ЦД/2705 МПС издания 1970 г.

14. Использование современных вычислительных и моделирующих машин открывает возможности для широкого применения теоретических методов исследования, позволяющих изучать влияние на переходный процесс отдельных параметров системы и дающих возможность ускорить и упростить исследования, существенно сократив при этом расходы на проведение дорогостоящих поездных испытаний. Если 10—15 лет назад основным методом изучения неустановившихся режимов движения считалось измерение продольных сил в поездах, то в настоящее время эти силы следует определять используя математические машины.

Поездные испытания необходимы только для проверки идеализаций, принятых при математическом описании реального явления, отработки новых и модернизируемых конструкций, накопления информации о статистических распределениях нагрузок, определения параметров реальных систем.

15. Приведенные в работе статистические распределения продольных усилий могут быть использованы для оценки прочностной надежности элементов конструкции вагона. Однако следует иметь в виду, что они охватывают лишь часть переходных режимов движения поездов — пуск и частично торможение. Поэтому необходимо проведение исследований, специально направленных на получение информации о статистических распределениях нагрузок, действующих на экипаж в поезде. Такая информация может быть получена и в лабораторных условиях при решении задач с помощью математических машин.

Все основные положения и выводы данной работы подтверждаются многочисленными расчетами, выполненными в лаборатории, и опытами, проведенными в реальных условиях.

Результаты исследований использованы при разработке технических требований на проектирование перспективных поглощающих аппаратов автосцепки и повышающих безопасность движения поездов систем управления локомотивами, находящимися внутри состава.

Технические требования на проектирование перспективных поглощающих аппаратов утверждены Министерством путей сообщения в 1971 году.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ БЫЛИ ДОЛОЖЕНЫ:**

- на Третьем Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (г. Москва, 1968 г.);
- на IV и V совещаниях по основным проблемам теории машин и механизмов (г. Киев, 1964 г., г. Сухуми, 1967 г.);
- на Всесоюзных совещаниях по проблеме нелинейных колебаний механических систем (г. Рига, 1964, 1966 гг.);
- на III Всесоюзной конференции по аналоговой вычислительной технике (г. Москва, 1969 г.);
- на III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов (г. Рига, 1969 г.);
- на Всесоюзной конференции по колебаниям механических систем (г. Киев, 1971 г.);
- на совещании по проблемам динамики сооружений и машин (г. Днепропетровск, 1964 г.);
- на XVII и юбилейной научно-технических конференциях Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (1967 г., 1970 г.);
- на 30 научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения (1968 г.);
- на заседании вагонной секции научно-технического совета МПС (г. Москва, 1969 г.);
- на заседаниях научно-технического совета вагонного отделения Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (г. Москва, 1968, 1969, 1970 гг.);
- на семинарах по механике кафедр Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (1964, 1965, 1970, 1971 гг.).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:**

1. Исследование с помощью ЭЦВМ пуска в ход предварительно сжатого поезда, у которого локомотивы рассредоточены по длине. Сборник «Некоторые задачи механики скоростного транспорта», изд. «Наукова думка», Киев, 1970.
2. Влияние неодновременного включения локомотивов на усилия в

НТБ  
ДНУЖТ

сдвоенном поезде. «Железнодорожный транспорт», изд. «Транспорт», М., 1970, № 12.

3. К вопросу об усилиях в неоднородном поезде. Труды ДИИТа, в. 133, Днепропетровск, 1971.

4. Продольные усилия, возникающие в объединенном сдвоенном поезде при регулировочных торможениях. Труды ДИИТа, в. 133, Днепропетровск, 1971.

5. К вопросу торможения объединенных поездов. Труды ДИИТа, в. 134, Днепропетровск, 1971.

6. Об усилиях при трогании объединенного стрессенного поезда. Труды ДИИТа, в. 134, Днепропетровск, 1971.

7. О влиянии неоднородности поезда на динамические усилия, возникающие в упряжных приборах при трогании с места. Труды ДИИТа, в. XXVI, Трансжелдориздат, М., 1958.

8. Электрическое моделирование продольных усилий, возникающих в неоднородных поездах при трогании с места. Труды ДИИТа, в. XXVI, Трансжелдориздат, М., 1958.

9. Применение электронных моделей к исследованию переходных режимов движения одномерных систем. Сборник «Аналоговая и аналогоцифровая вычислительная техника», изд. «Сов. радио», М., 1971 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов).

10. Продольная динамика в объединенных поездах повышенного веса. «Железнодорожный транспорт», 1971, № 6 (соавторы: О. Г. Бойчевский, П. Т. Гребенюк, Г. В. Костин).

11. Продольные колебания существенно нелинейных одномерных систем при распространяющихся возмущениях. Тезисы докладов конференции по колебаниям механических систем, изд. «Наукова думка», Киев, 1971 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. В. Белик).

12. К вопросу о математическом описании процессов, происходящих при переходных режимах движения поездов с зазорами в упряжи. Труды ДИИТа, в. 103, «Транспорт», М., 1971 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик).

13. О продольных усилиях и ускорениях вагонов с подвижной хребтовой балкой при трогании неоднородных поездов. Труды ДИИТа, в. 103, изд. «Транспорт», М., 1971 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Вашурин).

14. Интегральная оценка поведения связей в поезде и определение их параметров по результатам натуральных испытаний. Труды ДИИТа, в. 103, изд. «Транспорт», М., 1971 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Л. С. Вадикова).

15. О выборе численных методов интегрирования уравнений движения существенно нелинейных одномерных механических систем. Сборник «Некоторые вопросы скоростного транспорта», изд. «Наукова думка», Киев, 1970 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. В. Белик).

16. Применение ЭЦВМ к исследованию переходных режимов движения поездов. Труды ДИИТа, в. 114, Днепропетровск, 1970 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. В. Белик).

17. Влияние предварительной затяжки в поглощающих аппаратах на продольные усилия при соударении двух вагонов. Труды ДИИТа, в. 114, Днепропетровск, 1970 (соавторы: Л. А. Манашкин, Л. А. Вашурин).

18. Вплив неоднорідності одномірної системи на зусилля та прискорення при перехідному режимі. «Питання будівельної механіки», в. 101, «Будівельник», Київ, 1970 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин).

19. Влияние неоднородности состава на продольные усилия в поезде.

Труды ДИИТа, в. 120, Днепропетровск, 1970 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. В. Белик).

20. О продольных усилиях, возникающих при трогании однородного грузового поезда весом 10000 тонн. Труды ДИИТа, в. 84, изд. «Транспорт», М., 1970 (соавторы: В. А. Лазарян, А. И. Стукалов).

21. Требования на проектирование поглощающих аппаратов. «Железнодорожный транспорт», 1970, № 11 (соавторы: Л. Н. Никольский, Н. Г. Беспалов).

22. Экспериментальные исследования продольных усилий в грузовых поездах массой до 10 тыс. тонн при переходных режимах движения. Труды ЦНИИ МПС, в. 425, изд. «Транспорт», М., 1970 (соавторы: О. Г. Бойчевский, П. Т. Гребенюк, И. Б. Феоктистов).

23. Влияние формы характеристики междувагонной связи на переходный режим движения поезда. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик).

24. Результаты экспериментального исследования продольных ускорений при переходных режимах движения поездов. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 (соавторы: И. Г. Барбас, А. Д. Шпаковская).

25. Методика получения статистического распределения продольных сил, действующих на подвижной состав и оценка надежности элементов конструкции вагона. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 (соавторы: Л. Н. Никольский, С. И. Филиппюк, Н. А. Костенко).

26. Особенности построения статистических закономерностей сил, действующих в поезде, и оценка усталостной повреждаемости элементов вагонной конструкции. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 (соавторы: Л. Н. Никольский, С. И. Филиппюк, О. В. Фетисов).

27. Исследование с помощью ЭВМ процессов торможения поездов. Материалы III Всесоюзной конференции «Применение ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов», Рига, 1969 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик, А. В. Рыжов).

28. Применение ЭВМ к исследованиям переходных режимов движения при пуске поезда в ход. Материалы III Всесоюзной конференции «Применение ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов», Рига, 1969 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов).

29. Об определении оптимального значения необратимого поглощения энергии упруго-фрикционными амортизаторами. Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, в. 8, М., 1969 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов).

30. Ударные явления в динамике одномерных разветвленных систем. Теория механизмов и машин, в. 6, изд. ХГУ, Харьков, 1969 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов, Е. В. Юстина).

31. О распространении возмущений в одномерных системах с нелнейными упругими характеристиками и вязким сопротивлением связей. Аннотация докладов на III Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, М., 1968 (соавторы: И. Г. Барбас, Л. В. Белик, В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин).

32. Исследование переходных режимов движения сжатых поездов, вагоны которых оборудованы подвижными хребтовыми балками. Труды

ДИИТа, в. 76, 1968 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Е. В. Юспина).

33. Моделирование соударений отцепов из вагонов с подвижными хребтовыми балками. Труды ДИИТа, в. 76, изд. «Транспорт», М., 1968 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, А. В. Рыжов, Е. В. Юспина).

34. Движение легковых вагонов в составах тяжелых поездов. Труды ДИИТа, в. 76, изд. «Транспорт», М., 1968 (соавторы: В. А. Лазарян, Е. Л. Стамблер).

35. Исследование работы поглощающих аппаратов автосцепки в поездах. Труды ДИИТа, в. 68, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, Л. С. Бадикова, Е. В. Юспина).

36. Исследование работы поглощающих аппаратов автосцепки типа Р-4П в длинносоставном пассажирском поезде. Труды ДИИТа, в. 68, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, А. И. Стукалов, Л. А. Манашкин, Е. В. Юспина).

37. Исследование работы резино-металлических амортизаторов при ударах. Труды ДИИТа, в. 68, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, Л. А. Манашкин, Е. В. Юспина).

38. Продольные усилия, возникающие в тяжеловесном грузовом поезде при регулировочных торможениях. Труды ДИИТа, в. 68, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, А. И. Стукалов, Е. В. Юспина).

39. К вопросу о переходных режимах движения поездов, вагоны которых оборудованы поглощающими аппаратами Ш-2-Т. Труды ДИИТа, в. 72, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, В. А. Зеленский).

40. Об усилиях в грузовых поездах при торможении локомотива прямодействующим тормозом. Труды ДИИТа, в. 72, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас).

41. Переходные режимы движения поезда, составленного из вагонов с подвижной хребтовой балкой при отсутствии зазоров в упряжи. Труды ДИИТа, в. 72, изд. «Транспорт», М., 1967 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, Е. В. Юспина, Л. А. Вашурин).

42. Влияние веса и длины пассажирских поездов на продольные усилия. Труды ДИИТа, в. 62, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, Е. В. Юспина).

43. Исследование переходных режимов движения нелинейных одномерных механических систем. Сборник статей «Динамика машин», Машиностроение, М., 1968 (соавторы: И. Г. Барбас, В. А. Лазарян, В. А. Кабулов, Л. А. Манашкин).

44. Исследование работы поглощающих аппаратов ЦНИИ-Н6 в длинносоставных пассажирских поездах. Труды ДИИТа, в. 62, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, А. И. Стукалов, Е. В. Юспина).

45. Исследование работы резино-металлических поглощающих аппаратов типа Р-2П в пассажирских поездах. Труды ДИИТа, в. 59, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, А. И. Стукалов, Е. В. Юспина).

46. К вопросу о влиянии характеристик связей одномерных механических систем на переходные режимы. Труды ДИИТа, в. 59, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин, И. Г. Барбас).

47. О статических характеристиках некоторых поглощающих аппаратов. Труды ДИИТа, в. 62, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, А. И. Стукалов).

48. Результаты опытов по соударению пассажирских вагонов, оборудованных поглощающими аппаратами автосцепки типа ЦНИИ-Н6. Труды ДИИТа, в. 62, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, Е. В. Юпина).

49. О продольных динамических усилиях, возникающих в длинносоставном пассажирском поезде при прицепке к нему грузового состава весом 3000 т. Труды ДИИТа, в. 62, изд. «Транспорт», М., 1966 (соавторы: В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, Е. В. Юпина).

50. О выборе числа контуров при электрическом моделировании колебаний стержней. Труды ДИИТа, в. 50, Днепропетровск, 1964 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Манашкин).

51. Исследование с помощью модели — аналога усилий в упругих приборах поездов при тяге и подталкивании. Труды ДИИТа, в. 44, Трансжелдориздат, М., 1963 (соавтор В. А. Лазарян).

52. Исследование усилий, возникающих в поездах при включении в них восьмиосных полувагонов. Труды ДИИТа, в. 44, Трансжелдориздат, М., 1963 (соавтор В. А. Лазарян).

53. Продольные усилия, возникающие в тяжеловесных грузовых поездах при трогании с места. Труды ДИИТа, в. 35, Днепропетровск, 1961 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Львов).

54. Власні повздовжні коливання систем, які складаються з трьох жорстких тіл і двох деформівних стержнів. Прикладна механіка, 1961, т. VII, в. I (соавтор В. А. Лазарян).

55. Перехідні режими руху систем, що складаються з трьох жорстких тіл і двох деформівних стержнів. Прикладна механіка, 1961, т. VII, в. 5 (соавтор В. А. Лазарян).

НТБ  
ДНУЖТ

БТ 08479. Подписано к печати 3.XII.1971 г. Бумага 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. 1,75 печ. л.  
Заказ № 10097. Тираж 200 экз.  
Типография издательства «Зоря», г. Днепропетровск, Ленинградская, 56.

НТБ  
ДНУЖТ