

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР**

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА**

**На правах рукописи**

**УДК 629.4.015**

**УРСУЛЯК Людмила Викторовна**

**ПРОДОЛЬНАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ПОЕЗДА И ВЛИЯНИЕ НА НЕЕ УСЛОВИЙ  
СОПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОФИЛЯ ПУТИ**

**05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов**

**А в т о р е ф е р а т**

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

**Днепропетровск  
1988**

**НТБ  
ДНУЖТ**

Робота виконана в Дніпропетровському ордену Трудового Червоного  
Знамени інституті інженерів залізничного транспорту імені  
М.І.Кадина

Науковий керівник - заслужений працівник вищої школи УРСР,  
доктор технічних наук, професор Б.П.ВЛОХІН.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник П.Т.Гребенюк (ВНІИТ),  
кандидат технічних наук, головний  
науковий співробітник  
Г.І.Богданов (ІТМ АН УРСР)

Ведуче підприємство - Всесоюзний науково-дослідницький  
інститут транспортного будівництва

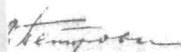
Захист дисертації состоится "2" лютий 1988 года  
в \_\_\_\_\_ часі на засіданні Спеціалізованого ради К ІІ4.07.01  
в Дніпропетровському ордену Трудового Червоного Знамени інституті  
інженерів залізничного транспорту імені М.І.Кадина  
(г.Дніпропетровськ, 820700, ГСП, ул.Акад.Лазаряна, 2)

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

\_\_\_\_\_ 1988 г.

взяти книгу не пізніше зазначеного терміну.

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

  
Л.В.ПЕТРОВИЧ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В условиях интенсивного развития народного хозяйства XXII съезд КПСС поставил перед железнодорожным транспортом задачу – полностью обеспечить к концу двенадцатой пятилетки потребности страны в перевозках грузов и пассажиров. Выдвигая эту задачу, съезд наметил пути развития и совершенствования работы железных дорог. Это прежде всего техническое перевооружение и дальнейшее увеличение провозной и пропускной способности грузонапряженных направлений при одновременном расширении сети железных дорог. Решение этих задач связано с увеличением массы и длины поездов, в том числе и пассажирских, и скорости их движения при одновременном повышении безопасности.

Исследуя динамику длинносоставного поезда, прежде всего следует обратить внимание на его продольную нагруженность. Она может достигать опасных (с позиции прочности и устойчивости вагонов от их выжимания) состояний, особенно при нестационарных процессах, вызванных управлением и переломами продольного профиля пути. В грузовых поездах приходится, как правило, рассматривать продольные силы, а в пассажирских – продольные ускорения, от величин и продолжительности которых зависит безопасность пассажиров. При движении длинносоставных пассажирских поездов по перевалистому участку пути большой протяженности следует анализировать также показатель плавности хода вагонов, который характеризует комфортабельность поездки пассажиров.

В условиях повышения масс, длин и скоростей движения поездов, увеличения погонной нагрузки, появления новых воздухораспределителей авто тормозов, необходимо было пересмотреть существующие нормы проектирования железных дорог с учетом динамической нагруженности длинносоставных грузовых и пассажирских поездов. При этом определялись такие условия сопряжения элементов продольного профиля, которые обеспечивают нормативную динамическую нагруженность вагонов в продольном направлении и наряду с этим уменьшают стоимость сооружения, в частности, объемы земляных работ. Поэтому определение условий сопряжений элементов профиля при одновременном повышении безопасности грузовых и комфортабельности пассажирских длинносоставных поездов является актуальной задачей.

Целью работы является:

- определение и разработка способов снижения продольной нагруженности длинносоставных поездов при торможении как наиболее опасном режиме движения;
- определение зависимостей продольных сил и ускорений от параметров поезда и профиля пути;
- определение условий сопряжений элементов продольного профиля пути по условиям динамической нагруженности длинносоставных грузовых и

пассажирских поездов ;

- определение в эксплуатационных условиях продольных сил, ускорений, а также показателя плавности хода вагонов в длинносоставных пассажирских поездах.

Методика исследования. Для решения поставленной задачи использовались методы математического моделирования, реализуемые на современных ЭВМ, стендовые испытания систем автоматического торможения и данные натурных опытов. Проводилось сопоставление результатов расчета с опытными данными.

Научная новизна:

- усовершенствована с учетом перспектив вождения длинносоставных грузовых и пассажирских поездов методика оценки условий сопряжений на переломах продольного профиля пути ; с её помощью установлены такие условия сопряжения элементов профиля, при которых наибольшие продольные силы и ускорения не превосходят допускаемые ;

- разработана методика определения тормозных сил в длинносоставных поездах, позволяющая автоматизировать процесс обработки данных стендовых и натурных испытаний автотормозов и уточнить определение продольных сил и ускорений при торможениях ; в связи с этим усовершенствован пакет прикладных программ "ПОЕЗД" и осуществлена его адаптация для ЭВМ СМ ;

- изучен вопрос о понижении порядка системы дифференциальных уравнений с целью сокращения затрат машинного времени и уменьшения объёма оперативной памяти, занимаемого пакетом прикладных программ "ПОЕЗД" при оценке продольных сил и ускорений в длинносоставных поездах ;

- разработаны алгоритмы и программы для отыскания неблагоприятного, с позиции наибольшего уровня продольных сил и ускорений, момента времени, при котором происходит включение автотормозов на переломе продольного профиля , а также для исследования динамической нагруженности поезда при наложении различных управляющих воздействий ;

- исследована продольная нагруженность поездов увеличенной длины, в том числе и тех, для которых натурные и стендовые испытания не могли быть проведены при существующих возможностях ; при этом получены рекомендации по выбору схем формирования и способов управления автотормозами.

Практическая ценность и внедрение результатов. Основные результаты исследований использованы при разработке пп.2.4, 2.6, 2.7 Строительных норм и правил, регламентирующих устройство продольного профиля пути, а также эскизного проекта высокоскоростной пассажирской магистрали Центр-Юг. Разработанная методика определения продольных сил и тормозных путей в поезде позволяет автоматизировать процесс обработки



опытных данных о параметрах автотормозов с применением ЭВМ. Результаты теоретических исследований динамической нагруженности длинносоставных поездов используются при разработке устройств управления автотормозами, а также рекомендаций по вождению. В частности, они были использованы при определении условий безопасного вождения поезда массой 43 тыс. т на Целинной железной дороге.

Апробация модели. Основные результаты докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (Днепропетровск, 1984); на Всесоюзной конференции по вибрационной технике (Тбилиси, 1987); на заседании кафедры "Строительная механика" ДИИТа (1983).

Публикации. Основные результаты исследований отражены в четырех отчетах по НИР и двенадцати опубликованных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения. Диссертация содержит 185 страниц текста, 105 рисунков, 18 таблиц. Список литературы включает 110 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сделан обзор литературы по динамике поезда, рассмотрено современное состояние вопроса и сформулированы задачи, решению которых посвящена данная работа.

Отмечено, что фундаментальные исследования в этой области выполнены Н. Е. Жуковским, В. А. Лазарьном, Е. П. Блохиным, С. В. Вершинским, П. Т. Гребенюком, В. Г. Иноземцевым, Л. А. Манашкиным, И. А. Панькиным и другими авторами.

Развитые ими методы используются при решении рассматриваемых задач. Вместе с тем потребовалось дополнительно усовершенствовать методику оценки условий сопряжений элементов продольного профиля пути. Потребность в этом возникла в связи с разработкой новой редакции Строительных норм и правил (СНиП), в которой впервые регламентируется устройство линий, предназначенных для эксплуатации грузовых поездов увеличенной (до 2100 м) длины со скоростями порядка 120 км/ч, пассажирских поездов со скоростями движения до 200 км/ч, а также эскизным проектированием высокоскоростной специализированной магистрали Центр-Юг, допускающей движение поездов со скоростями до 300 км/ч.

При определении нормируемых значений радиусов круговых кривых сопряжений элементов профиля по условиям динамической нагруженности грузовых поездов увеличенной длины необходимо наряду с ударными нагрузками принимать во внимание и квазистатические усилия, которые в указанных поездах могут достигать величин, опасных с позиции устойчивости вагонов в колее. Оценка продольного профиля пути пассажирских линий

должна производиться по условиям безопасности и комфортабельности поездки пассажиров. В связи с этим потребовалось исследовать динамическую нагруженность длинносоставных скоростных пассажирских поездов при их движении по пути ломаного профиля с учетом управляющих воздействий.

Большой объем расчетов сделал необходимым дополнить пакет прикладных программ "ПОЕЗД", разработанный НИИ динамики и прочности подвижного состава ДИИТа, программами, позволяющими автоматизировать процесс обработки полученных с помощью аппаратуры точной магнитной записи данных стендовых и натурных испытаний автотормозов с целью определения их параметров и процесс поиска наиболее неблагоприятного наложения управляющих воздействий и воздействий, вызванных переломами продольного профиля пути, а также рассмотреть вопрос понижения порядка системы дифференциальных уравнений при определении продольных сил и ускорений в длинносоставных поездах с целью сокращения затрат машинного времени.

Необходимость изучения с помощью математической модели динамической нагруженности поездов, длина которых значительно превышала длину опытных, потребовало разработать процедуру компиляции экспериментальных данных, полученных для поездов меньшей длины.

В первой главе приведена математическая модель, с помощью которой исследуется динамическая нагруженность длинносоставных поездов, и проведено сопоставление численных результатов с опытными данными.

В качестве расчетной схемы использована одномерная цепочка твердых тел, соединенных между собой существенно нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упряжках. При этом движение поезда описывалось следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{V}_j = (S_j - S_{j+1} + F_j) / m_j & j = 1, \dots, N; S_1 = S_{N+1} = 0 \\ Q_j = V_{j-1} - V_j & j = 2, \dots, N \\ \dot{x}_1 = V_1 \end{cases} \quad (I)$$

где  $N$  - число экипажей в поезде;  $Q_j = x_{j-1} - x_j$  - относительное перемещение центров масс двух соседних экипажей;  $x_j$  - криволинейная координата центров масс  $j$ -го экипажа;  $V_j$  - его скорость;  $S_j$  и  $S_{j+1}$  - продольные силы, действующие на этот экипаж;  $F_j$  - результирующая внешних сил, приложенная к  $j$ -му экипажу.

Указанная система дифференциальных уравнений решалась при заданных начальных и дополнительных условиях с использованием численных методов интегрирования, которые выбраны с учетом особенностей дифферен-

циальных уравнений и получаемых решений.

Вид функции  $S_j(q_j, \dot{q}_j)$  определялся характеристикой элементов межвагонного соединения. При моделировании межвагонного соединения пассажирского поезда, оборудованного пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами ЦНИИ-НБ, учитывались билинейность характеристики при нагружении, а также наличие буферных устройств.

В качестве внешних сил рассматривались составляющие сил тяжести от уклона пути, силы основного сопротивления движению, сила тяги локомотива и тормозная сила.

Предполагалось, что продольный профиль пути состоит из прямолинейных участков длиной  $l$  с руководящим уклоном  $i_r$ , которые сопрягаются в вертикальной плоскости круговыми кривыми радиуса  $R$ .

Зависимости силы тяги локомотивов от скорости движения брались в соответствии с паспортными тяговыми характеристиками, а силы основного сопротивления движению - по известным эмпирическим формулам.

Сила, действующая на экипаж при пневматическом и электропневматическом торможениях, определялась числом и типом тормозных колодок  $K_j(t)$  колеса и силами нажатия на одну колодку  $K_j(t)$ . Последние зависят от типа автотормозов, режима торможения и определялись экспериментально при натурных или стендовых испытаниях.

Для этого в нескольких рассредоточенных по длине поезда тормозных цилиндрах устанавливались датчики давления, которые позволяли регистрировать с помощью установок точной магнитной записи процесс изменения давлений в цилиндрах  $P_{ci}(t)$ . Число измерительных тормозных цилиндров зависело от длины поезда. С помощью специальной аппаратуры электрические сигналы, записанные на магнитограммах, преобразовывались в цифровые коды путем квантования с определенным шагом  $\Delta t$ . При этом предварительно определялись опорные напряжения используемых каналов магнитографа, соответствующие нулевым значениям исследуемых процессов. Значение времени  $\Delta t$  после проведения расчетов для разных его значений из интервала  $0,2+1,0$  сек было принято  $0,5$  сек.

Полученные зависимости  $P_{ci}(t)$ , использовались для определения значения силы нажатия  $K_i(t)$  на тормозную колодку для  $i$ -го измерительного сечения в данный момент времени:  $K_i(t) = (P_{ci}(t) - P_0) A \eta$  где  $P_{ci}(t)$  - функции изменения давления в тормозном цилиндре;  $P_0$  - величина давления в тормозном цилиндре, соответствующая концу этапа подвода тормозных колодок к колесу экипажа;  $A$  - площадь поршня тормозного цилиндра;  $\eta$  - передаточное число рычажной передачи.

В данный момент времени сила нажатия для  $j$ -го экипажа, расположенного между измерительными сечениями, равная нулю до прихода тормозной волны в указанное сечение, на этапе нарастания определялась следую-

щим образом:

$$K_j(t) = \frac{J - D_i}{D_{i+1} - D_i} \left[ \frac{t - t_n - T_i + (l-1)\Delta t}{\Delta t} (K_{e,i+1} - K_{e,i}) + K_{e,i+1} \right] - \\ - \left[ \frac{t - t_n - T_i + (l-1)\Delta t}{\Delta t} (K_{e,i} - K_{e,i-1}) + K_{e,i} \right] \frac{J - D_{i-1}}{D_i - D_{i-1}}$$

где  $t_n$  - момент начала торможения;  $T_i$  - время, в течение которого тормозная волна приходит из головного в  $j$ -е сечение;  $t$  - текущее время;  $D_i$  - номер сечения в поезде, где устанавливался  $i$ -ый измерительный прибор;  $K_{e,i}$  - величина силы нажатия, соответствующая  $i$ -й узловой точке для  $i$ -го измерительного прибора.

Изложенная методика позволила для каждого сечения получить необходимое число узловых точек зависимости  $K_j(t)$ , определяемое промежутком времени, в течение которого происходит торможение и приблизить на 10% значение наибольших продольных сил и ускорений, найденных в результате расчетов, к соответствующим значениям, полученным экспериментально.

Так как аналого-цифровой преобразователь входит в комплекс вычислительной машины серии СМ, то дальнейший расчет продольных усилий, возникающих при торможении поезда производился на этой же машине. Для этого пакет прикладных программ "ПОЕЗД" был модифицирован и адаптирован для указанной машины.

В работе приводится описание следующих программ, расширяющих возможность применения ППП "ПОЕЗД" для: а) исследования нагруженности поезда при наложении различных управляющих воздействий; б) отыскания неблагоприятного, с позиции наибольшего уровня продольных сил и ускорений, момента времени, при котором происходит включение автотормозов на переломе продольного профиля; в) оценки показателя плавности хода вагонов при движении длинносоставного пассажирского поезда по перевалистому участку пути большой протяженности.

При решении рассматриваемых задач исследован вопрос о понижении порядка системы дифференциальных уравнений. Понижение порядка системы дифференциальных уравнений при исследовании продольных сил в длинносоставных поездах осуществлялось в два этапа. На первом этапе - сокращается объем оперативной памяти, занимаемый пакетом прикладных программ "ПОЕЗД", на втором этапе - сокращаются затраты машинного времени, при этом погрешность вычисления максимальных сил не превосходит 10%.

В работе показано, что при исследовании наибольших продольных ускорений известный метод понижения порядка системы дифференциальных уравнений неприемлем. Поэтому понижение порядка системы дифференциальных уравнений осуществлялось в предположении, что р тел моде-

лирует движение групп из  $\tilde{n}$  экипажей, а остальные  $K = N - \tilde{n}$  (часть поезда, где ожидалось максимальные ускорения) движение отдельных вагонов. Здесь  $N$  – число экипажей в поезде. Погрешность вычислений при этом не превышала 10%.

Для проверки достоверности математической модели грузового и пассажирского поездов проводилось сопоставление результатов решения задач, полученных путем численного интегрирования дифференциальных уравнений, с величинами продольных сил, измеренных во время опытных поездок с грузовым поездом массой 10 тыс. т и продольных ускорений, измеренных в опытном длинносоставном пассажирском поезде, состоящем из 36 вагонов. Отмечено, что погрешность в оценке наибольших продольных сил, ускорений и тормозных путей не превышала 15%.

Во второй главе приводятся результаты исследований продольной нагруженности грузовых поездов при торможениях на горизонтальном участке пути.

При исследовании торможений рассматривались грузовые поезда, составленные из груженых четырехосных полувагонов, оборудованных воздухораспределителями № 483 (разрядное отверстие диаметром 0,9 мм), композиционными колодками и пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами. Предполагалось, что воздухораспределители могут быть включены либо на средний, либо на груженный режим работы, а вагоны имеют перспективную массу 100 т.

Рассматривались различные виды торможений: экстренные (ЭТ) и полные служебные торможения (ПСТ) с начальными скоростями движения 30–90 км/ч и регулировочные торможения (РТ) с начальными скоростями движения 40–120 км/ч, а также аварийные случаи разрыва тормозной магистрали.

В результате расчетов были получены диаграммы распределения по длине поезда максимальных усилий, тормозные пути и времена, в течение которых скорость движения снижалась на 10 км/ч при регулировочном торможении. Рассмотрение торможений растянутых поездов позволило получить наибольшие ударные усилия, а сжатых – усилия квазистатического характера.

Изучена продольная нагруженность поездов массой до 18 тыс. т с установкой локомотивов только в голове поезда. Найдены зависимости тормозных путей  $L$  при ПСТ и ЭТ и времен  $T$  (снижения скорости движения на 10 км/ч – при РТ) от числа  $N$  экипажей в поезде.

Практический интерес представляют полученные зависимости наибольших сил от числа экипажей в поезде для различных режимов работы воздухораспределителей. Показано, что при увеличении массы поезда с 6 до 18 тыс. т при груженом режиме работы воздухораспределителей наибольшие

ударные усилия при экстренном торможении с начальной скорости 30 км/ч изменялись в диапазоне 1,7-5,7 МН, при полном служебном торможении - 1,2-3,1 МН, при регулировочном торможении 1,0-1,6 МН. При переключении воздухораспределителей с груженого на средний режим работы наибольшие продольные усилия снижались как правило на 25%.

Используя полученные зависимости и исходя из того, что уровень наибольших значений сил не должен превышать допустимого по условиям прочности и устойчивости вагонов, можно заключить, что поезд с локомотивами в голове можно формировать не более чем из 100 вагонов на среднем режиме работы воздухораспределителей и из 80 вагонов - на груженом режиме работы воздухораспределителей. Это заставляет искать дальнейшие пути снижения продольной нагруженности поездов увеличенной длины, в частности, формировать их в виде соединенных.

Поэтому при оценке продольных сил в поездах массой 20 тыс.т рассматривались две схемы формирования. Предполагалось, что один локомотив расположен в голове, а второй - либо в середине, либо на расстоянии одной трети от хвостовой части поезда. Для сравнения исследовались торможения такого же поезда с локомотивами в голове. Рассматривались разные способы управления тормозами поезда: синхронное и по волне разрядки магистрали (основной или вспомогательной). Для случая размещения вспомогательного локомотива в середине поезда решены также задачи о торможениях поезда из вспомогательного локомотива.

Изучались также аварийные случаи отказа системы управления тормозами на вспомогательном локомотиве. Во всех описанных приемах торможения тормозная магистраль всего поезда была сквозной. Для случая размещения вспомогательного локомотива в середине поезда в вариантах синхронного торможения и управления по тормозной волне рассмотрено также торможение поезда, у которого тормозные магистрали первого и второго состава были разобщены. Анализировались различные случаи эксплуатационных утечек воздуха из тормозной магистрали.

Результаты теоретических исследований показали, что при необходимости вождения тяжеловесных поездов массой до 20 тыс.т их формирование должно производиться с установкой локомотивов в голове и на расстоянии  $1/3$  длины от хвоста поезда. Поезда должны быть оснащены системой синхронного торможения с резервной системой управления по тормозной волне. В случае, если по условиям эксплуатации вспомогательный локомотив оказывается в середине поезда, управление тормозами должно осуществляться с этого локомотива по радиокомандам машиниста головного локомотива.

Анализ результатов расчета продольных сил при торможении поезда массой 20 тыс.т позволил дать рекомендации по формированию соединенных поездов большой массы. Используя указанные рекомендации, исследовалась

динамическая нагруженность соединенных поездов массой 18-54 тыс. т. со сквозной магистралью. При этом наряду с эксплуатационными режимами торможения рассматривались наиболее опасные для таких поездов аварийные случаи разрыва тормозной магистрали в наиболее удаленных от локомотивов сечениях. Предполагалось, что локомотивы оборудованы специальными устройствами, которые после прихода тормозной волны с места разрыва осуществляли синхронное торможение поезда со всех локомотивов с помощью радиуправляемых кранов машиниста. При этом возможно некоторое запаздывание  $\tau$  в срабатывании этого устройства. В связи с этим определялось допустимое время  $\tau$ , при котором наибольшие усилия, возникающие при таком способе торможения не будут превышать допускаемых.

Проведенные расчеты показали, что для безопасного торможения сверхтяжелых соединенных поездов, включая аварийные режимы, необходимо: а) создание радиуправляемых кранов машиниста, обеспечивающих синхронное включение автотормозов поезда на всех локомотивах, при этом наибольшие усилия в эксплуатационных режимах не превышали 1,4 МН; б) создание устройств автоматического включения радиокоманды на экстренное торможение по тормозной волне, пришедшей с места разрыва тормозной магистрали на ближайший локомотив, причем запаздывание с включением не должно превышать 1-1,5 сек.

Работы по созданию таких устройств не завершены, поэтому рассмотрен еще один способ безопасного вождения поездов такой массы (18-54 тыс. т) при управлении автотормозами только с локомотивов, установленных в голове. При этом предполагалось, что тормозные средства на определенных вагонах отключены и таким образом уменьшена тормозная эффективность поезда. Проведенные расчеты позволили получить для различных длин поездов зависимости наибольших продольных сил от тормозной эффективности и найти допустимые значения последней по условиям прочности вагонов.

В третьей главе приводятся результаты исследования продольных усилий в длинносоставном грузовом поезде при его движении по переломам продольного профиля пути, выполненные с целью определения условий сопряжения элементов профиля. Согласно СНиП эти условия сопряжения делятся на рекомендуемые и допускаемые. При этом полагалось, что рекомендуемые нормы используются для проектирования участков, на которых возможно наложение возмущений от действий машиниста по управлению поезда на возмущения от переломов профиля пути, а допускаемые нормы - для проектирования участков пути, где такое наложение исключается.

Для оценки ударных нагрузок в качестве расчетного варианта выбран въезд на вогнутый перелом растянутого поезда, а для определения квазистатических сил - сжатого.

При исследовании переходных режимов движения поездов, вызванных переломом профиля пути, длины поездов принимались равными длинам приемо-отправочных путей станций. Рассматривались поезда длиной до 2500 м. Начальные скорости движения варьировались в диапазоне  $V_0 = 40 \pm 120$  км/ч. Параметры профиля пути: алгебраическая разность уклонов  $\Delta i$  и радиус  $R$  сопрягающей кривой варьировались в следующих диапазонах:  $\Delta i = 0,004 \pm 0,060$  с шагом 0,002;  $R = 0 \pm 150$  км с шагом 5 км.

В результате расчетов были получены зависимости наибольших ударных и квазистатических продольных сил  $\max S$ , возникающих в поездах различной длины от радиуса сопряжения  $R$  и алгебраической разности уклонов  $\Delta i$ , а также зависимости наибольших ударных сил от скорости движения и длины поезда. Отмечается, что наибольшие продольные усилия растут с увеличением скорости движения и длины поезда и уменьшаются с ростом радиуса кривой сопряжения, а в области малых радиусов и с уменьшением алгебраической разности уклонов  $\Delta i$ . Оказалось, что для каждого значения радиуса  $R$  существует такая величина разности уклонов  $\Delta i_1$ , что при  $\Delta i > \Delta i_1$  наибольшие продольные усилия не зависят от алгебраической разности уклонов. По результатам расчетов получены зависимости указанной алгебраической разности уклонов  $\Delta i_1$  от радиуса сопрягающей кривой  $R$  для квазистатических и ударных продольных сил.

При определении рекомендуемых норм исследовался режим регулируемого торможения, так как из эксплуатационно возможных ситуаций наиболее опасной с точки зрения возникновения наибольших сжимающих продольных сил является случай торможения при въезде растянутого поезда на участок пути вогнутого профиля. При этом производился поиск той точки на переломе профиля, где включение тормозов приводит к наибольшим ударным сжимающим силам. При использовании результатов, полученных во второй главе, полагалось, что локомотивы поездов нормальной длины (до 1250 м) размещены в голове поезда, а поездов увеличенной длины — также и внутри состава; при этом "внутренние" локомотивы оборудовались радиоуправляемыми с головного локомотива кранами синхронного торможения. Считалось, что при оценке ударных сил в поездах увеличенной длины торможение осуществлялось с применением этих кранов, а квазистатических сил — торможение лишь с головного локомотива.

Для сокращения объема вычислений получены расчетные зависимости, аппроксимирующие данные вычислений, позволяющие оценить уровень продольных сил в поездах длиной до 2500 м, движущихся со скоростями до 120 км/ч.

В результате проведенных исследований получены нормы устройства



сопряжения на переломах профиля.

В качестве примера в табл. I приведены рекомендуемые (в числителе) и допускаемые (в знаменателе) значения нормируемых радиусов сопрягающей кривой  $R_n$ , наибольшей разности уклонов смежных элементов  $\Delta i_n$  и наименьшей длины прямолинейного элемента профиля  $l_n$

Таблица I

| Категория<br>линии                                               | Длина по-<br>езда, $l$ м | 50      | 1050    | 1700    | 2100    |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Внекатегори-<br>ная особогрузо-<br>напряженная<br>$V = 120$ км/ч | $R$ , км                 | 45/15   | 82/20   | 125/75  | 125/75  |
|                                                                  | $\Delta i$ , ‰           | -       | 3/10    | 3/5     | 3/4     |
|                                                                  | $l$ , м                  | -       | 250/200 | 250/250 | 400/300 |
| I<br>$V = 120$ км/ч                                              | $R$ , км                 | 35/15   | 65/20   | 75/46   | 105/70  |
|                                                                  | $\Delta i$ , ‰           | 6/13    | 4/10    | 3/5     | 3/4     |
|                                                                  | $l$ , м                  | 200/200 | 250/200 | 250/250 | 300/300 |

В четвертой главе изучена продольная нагруженность длинносоставных пассажирских поездов при пневматическом и электропневматическом торможениях на участке пути прямолинейного профиля. Исследования проводились с целью уточнения численных значений параметров междвагонных соединений и автотормозов по результатам натурных опытов. Расчеты позволили сократить объем дорогостоящих натурных испытаний.

В результате проведенных расчетов получены диаграммы распределения максимальных сил и ускорений по длине поезда при регулируемом, полном служебном и экстренном торможениях при длинносоставными короткосоставном режимах работы воздухораспределителей. Показано, что переключение воздухораспределителей с короткосоставного на длинносоставный режим работы уменьшает уровень ускорений на 40-45%.

Данные расчетов подтвердили сделанные по результатам натурных опытов выводы о допустимых длинах поездов для различных способов управления и разных режимов работы воздухораспределителей, а также выработаны рекомендации по созданию необходимых устройств управления.

В результате проведенных расчетов была получена также следующая дополнительная информация: 1) найдены зависимости наибольших продольных сил и ускорений от скорости движения в диапазоне 10-120 км/ч в режиме экстренного торможения; 2) исследовано влияние промежутка времени от сброса тяги до включения тормозов на уровень наибольших продольных ускорений; 3) оценено влияние тормозной эффективности в

поезде на продольную нагруженность. В последнем случае показано, что безопасное вождение поездов, содержащих до 40 вагонов при пневматическом способе управления автотормозами на длинносоставном режиме работы воздухораспределителей возможно при уменьшении тормозной эффективности в два раза путем выключения на каждом втором вагоне тормозного цилиндра.

В пятой главе приведены результаты исследований продольных ускорений вагонов длинносоставных пассажирских поездов при движении по переломам продольного профиля пути, которые были использованы: 1) для проверки значений нормированных радиусов сопряжения, полученных в третьей главе, для линий, где предусматривается движение как грузовых, так и пассажирских поездов; 2) для определения условий сопряжения элементов профиля внекатегорийной скоростной линии, предназначенной для обращения только пассажирских поездов; 3) для определения нормированных значений радиусов сопряжения элементов высокоскоростной специализированной магистрали Центр-Юг. При этом полагалось, что наибольшие значения получаемых ускорений в самих неблагоприятных случаях не должны превышать величин, обеспечивающих комфорт пассажиров. Рассматривались пассажирские поезда длиной до 1250 м с числом вагонов до 48. Как в главе III в качестве расчетных режимов были выбраны при определении рекомендуемых норм - регулировочное торможение в наиболее неблагоприятной (с позиции уровня продольных ускорений) точке участка пути вогнутого профиля, очерченного круговой кривой заданного радиуса, а при определении допускаемых норм - движение по этому же участку "на выбеге". Заметим, что из-за наличия буферных устройств влияние зазоров всегда имеет место при движении поезда именно по вогнутому перелому профиля. Предполагалось, что допускаемый уровень ускорений при определении допускаемых норм равнялось  $0,3g$ , а при определении рекомендуемых норм -  $0,5g$ .

В результате расчетов были получены для разных вариантов осциллограммы продольных ускорений различных вагонов поезда, распределения их максимальных значений по длине поезда, значения наибольших в поезде ускорений в данный момент времени, а также зависимости этих величин от числа вагонов в поезде, скорости движения, алгебраической разности уклонов на переломе профиля и радиуса кривой сопряжения на переломе. Оказалось, что при движении длинносоставного пассажирского поезда по пути ломаного профиля, вдоль поезда пробегает волна ударов, которая вызывает рост ускорений особенно в хвостовой части поезда. Отмечается резкое увеличение наибольших продольных ускорений в тех случаях, когда в процессе сжатия поглощающего аппарата происходит переход с первого на второй участок нагружения, где жесткость на порядок выше.

Следует также отметить, что наибольшие ускорения (также как и продольные усилия) растут с увеличением алгебраической разности уклонов  $\Delta i$  пока  $\Delta i < \Delta i_1$ , длины поезда  $L$  и скорости движения  $V$  причем зависимость от скорости тем существенней, чем больше длина поезда и уменьшаются с ростом радиуса кривой сопряжения  $R$ . В результате проведенных расчетов получены зависимости величины  $\Delta i_1$  от радиуса сопрягающей кривой  $R$  для поездов различной длины.

При определении рекомендуемых норм предполагалось, что регулируемое торможение осуществлялось в один приём с доведением давлений в тормозных цилиндрах до 0,1 МПа с помощью электропневматических тормозов (ЭПТ). Для поездов, движущихся со скоростями 250–350 км/ч предусматривалось сочетание электропневматического тормоза в электромагнитным.

Для сокращения объёма вычислений найдены расчетные зависимости, аппроксимирующие данные вычислений, позволяющие приблизительно оценить уровень продольных ускорений при движении "на выбеге" и регулировочных торможениях на криволинейном участке пути.

В качестве примера, в табл.2 помещены значения нормированных радиусов  $R_n$ , наибольшей разности уклонов смежных элементов  $\Delta i_n$  и наименьшей длины прямолинейного элемента профиля  $l_n$  (числитель – рекомендуемые нормы; знаменатель – допускаемые).

Таблица 2

| Категории линии                                                        | $L$ , м        | 850 м   | 1050 м  |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|
| Высокоскоростная<br>специализированная<br>магистраль<br>$V = 300$ км/ч | $R_n$ , км     | 65/50   | 100/70  |
|                                                                        | $\Delta i$ , ‰ | 6/8     | 4/7     |
|                                                                        | $l$ , м        | 400/400 | 400/450 |
| Внекатегорийная<br>скоростная<br>$V = 200$ км/ч                        | $R_n$ , км     | 40/25   | 70/35   |
|                                                                        | $\Delta i$ , ‰ | 6/10    | 4/9     |
|                                                                        | $l$ , м        | 250/250 | 300/300 |

Следует отметить, что для линий, предусматривающих движение как грузовых, так и пассажирских поездов динамическая нагруженность грузового поезда является определяющей.

Наряду с расчетными режимами движения рассматривались также эксплуатационные режимы движения пассажирского поезда, состоящего из

40 вагонов, со скоростью  $V = 200$  км/ч по реальному участку пути протяженностью 12 км. Управление осуществлялось с целью поддержания заданной скорости движения. При этом определялся критерий плавности хода хвостового вагона поезда в продольном направлении. Результаты расчета показали, что наибольшие продольные ускорения и критерий плавности хода не превышали допустимых уровней. При этом условие непревышения заданного уровня продольных ускорений оказалось более жестким.

### Заключение и выводы

1. Усовершенствована методика определения параметров сопряжения на переломах продольного профиля пути по условиям динамической нагруженности скоростных длинносоставных грузовых и пассажирских поездов. Она использована для разработки новой редакции пп.2.4, 2.6, 2.7 Строительных норм и правил, регламентирующих устройство продольного профиля пути, а также при эскизном проектировании высокоскоростной специализированной магистрали Центр-Юг.

2. Выполнены расчеты продольных сил и ускорений, возникающих при торможении длинносоставных грузовых и пассажирских поездов для различных схем формирования и способов управления автотормозами, позволившие существенно сократить объем натурных испытаний.

3. Разработаны некоторые рекомендации, обеспечивающие безопасный пропуск поездов массой более 10 тыс.т. Они использованы, в частности, при проведении ВНИИЖТом опытной поездки с поездом массой 43 тыс.т.

Для этого:

- использованы математическая модель продольных колебаний поезда в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, алгоритм и программа их численного интегрирования, а также данные натурных и стендовых испытаний;

- разработана методика, алгоритм и программа определения тормозных сил в длинносоставных поездах, позволяющая автоматизировать процесс обработки опытных данных, полученных с помощью установок точной магнитной записи в ходе натурных или стендовых экспериментов с тормозными системами;

- изучены особенности использования приёма понижения порядка системы дифференциальных уравнений при оценке продольных сил и ускорений в длинносоставных грузовых и пассажирских поездах;

- дополнен пакет прикладных программ "ПОЕЗД" программами, позволяющими отыскивать неблагоприятный, с позиции наибольшего уровня продольных сил и ускорений, момент времени, при котором происходит включение автотормозов на переломе продольного профиля пути; исследовать

динамическую нагруженность поезда при наложении различных управляющих воздействий; оценивать показатель плавности хода вагонов при движении пассажирского поезда по перевалистому участку пути большой протяженности;

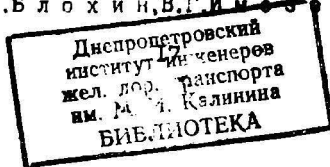
- разработана процедура компиляции данных о характеристиках автотормозов для поездов, длины которых значительно превышали длины поездов, исследованных в ходе натурных и стендовых испытаний;

- проверена достоверность математической модели путем сопоставления результатов численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений с опытными данными; отмечено их вполне удовлетворительное соответствие;

- получены и проанализированы осциллограммы продольных сил и ускорений, диаграммы распределения их максимальных значений по длине поезда, зависимости наибольших продольных сил и ускорений от длины поездов, скоростей движения, схем формирования, способов управления, параметров автотормозов и параметров переломов продольного профиля.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Болотов А.Н., Урсуляк Л.В., Дспина Е.В. Переходные режимы движения длинносоставных пассажирских поездов//Проблемы механики железнодорожного транспорта:Тез.докл.Всесоюз.конф.-Днепропетровск,1984.-С.53.
2. Выбор способов виброзащиты одной нелинейной одномерной системы/Е.П.Блохин, В.В.Клевевский, С.Г.Крюков, Е.Л.Стамблер, Л.В.Урсуляк//Тез.докл.Всесоюз.конф.по вибрационной технике.-Тбилиси:АН СССР,-1987.-С.43.
3. Исследование продольной нагруженности вагонов в длинносоставных пассажирских поездах при торможении/Е.П.Блохин, Л.Г.Маслеева, Е.Л.Стамблер, Л.В.Урсуляк//Проблемы динамики, прочности и устойчивости железнодорожного подвижного состава:Межвуз.сб.научн.тр.-Днепропетровск:ДНУТ.-1986.-С.24-27.
4. К разработке новых норм сочленения элементов продольного профиля пути/Е.П.Блохин, И.В.Турбин, И.И.Кантор, Е.Л.Стамблер, Б.И.Гороховцев, Л.В.Урсуляк//Транспортное строительство.-1986\_-№9.-С.6-9.
5. Об оценке уровня продольных ускорений по продольным усилиям в поезде, оборудованном аппаратами ЦНИИ-Н6/Е.П.Блохин, Е.Л.Стамблер, С.Г.Крюков, Л.В.Урсуляк//Проблемы динамики, прочности и устойчивости железнодорожного подвижного состава:Межвуз.сб. научн.тр.-Днепропетровск:ДНУТ.-1987.-С.40-45.
6. Об одном возможном способе безопасного вождения тяжеловесных грузовых поездов/Е.П.Блохин, В.Г.Иванов, М.И.Мещеряков, Е.Л.Стамб-



- лер, Л.В. Урсуляк // Вестник ВНИИЖТ. - 1987. - №4. - С.1-4.
7. О торможении сверхтяжелых соединенных поездов / Е.П. Блохин, В.Г. Иноземцев, Е.Д. Стамблер, Л.В. Урсуляк // Вестник ВНИИЖТ. - М.: Транспорт. - 1985. - №6. - С.1-3.
8. О вождении поезда массой 20 тыс. т / Е.П. Блохин, В.Г. Иноземцев, В.В. Крылов, Е.Д. Стамблер, Л.В. Урсуляк // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез. докл. на Всес. конф. - Днепропетровск. - 1984. - С.11.
9. Об устройстве сопряжений на переломах продольного профиля пути / Е.П. Блохин, И.И. Кантор, Е.Д. Стамблер, Л.В. Урсуляк // Транспортное строительство. - 1987. - №10. - С.8-11.
10. О торможении поезда массой 20 тыс. т / Е.П. Блохин, В.Г. Иноземцев, В.В. Крылов, Е.Д. Стамблер, Л.В. Урсуляк // Вестник ВНИИЖТ. - 1984. - №6. - С.1-4.
11. Торможение поездов разной длины при воздушном распределителе № 483 / Е.П. Блохин, В.Г. Иноземцев, В.В. Крылов, Е.Д. Стамблер, Л.В. Урсуляк // Эксплуатация автотормозов на подвижном составе железных дорог СССР: Об. научн. тр. ВНИИЖТ. - И.: Транспорт. - 1987. - С.123-124.
12. Урсуляк Л.В. Об автоматической оценке тормозных сил в грузовых поездах различной длины // Динамическая нагруженность железнодорожного подвижного состава: Мехвуз. об. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ. - 1988. - С.20-25.



**Урсудли Ладмила Витерезана**

**"Продольная нагруженность поезда и влияние на нее условий сопряжений элементов профиля пути"**

**05.22.07 - подыкной состав железных дорог и тига поездов**

**Подписано к печати 19.05.86. ВТ 70084 формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт, Уед. печ. л. I. Уч.-изд. л. I Тираж 100 экз. Заказ 809. Бесплатно.**

**Участок оперативной полиграфии ДНУ**

**320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Акад. В. А. Лазаряна, 2**