

Б 75

МПС — СССР

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

---

---

**БОДЯНОВ П. С.**

**К ВОПРОСУ О ПРОДОЛЬНЫХ УСИЛИЯХ  
ПРИ СОУДАРЕНИЯХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

1241/2

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

**ДНЕПРОПЕТРОВСК  
1958 г.**

НТБ  
ДНУЖТ

Значительное увеличение грузооборота железнодорожного транспорта в шестой пятилетке неразрывно связано с ростом технической оснащенности железных дорог. В числе мероприятий, способствующих этому, предусматривается постройка новых локомотивов и вагонов.

Проектируя новый подвижной состав, следует всемерно стремиться к улучшению его динамических характеристик. Увеличивая подъемную силу вагона, необходимо добиваться снижения коэффициента тары.

Правильное назначение расчетных усилий при проектировании подвижного состава требует более полного изучения причин, порождающих большие продольные усилия.

Наибольшие продольные усилия, как правило, относятся к числу ударных. Ударные усилия возникают при формировании и расформировании поездов. Так как в упряжных приборах грузовых поездов имеются зазоры, то в ряде случаев при трогании с места и торможении поездов, и всегда при следовании по перевалистому профилю пути, также возникают ударные усилия. Силы при ударах в отдельных случаях достигают величины 200—250 тонн и являются причиной повреждения вагонов и грузов.

Очень важным является исследование ударных усилий при переходных режимах движения поездов, получающиеся вследствие зазоров в упряжных приборах. Так, при экстренных торможениях тяжеловесных длинносоставных грузовых поездов ударные усилия, получающиеся вследствие зазоров в упряжи, в некоторых случаях превосходят 250 тонн.

Исследованием ударных усилий в подвижном составе занимались многие ученые.

Впервые влияние зазоров между вагонами учел Н. Е. Жуковский, рассматривая трогание с места сжатого поезда на винтовой упряжи с провисшими стяжками. Профессор В. А. Лазарян теоретически исследовал ударные усилия в упряжных аппаратах, принимая поезд за упругий стержень. Профессор Л. Н. Никольский очень обстоятельно исследовал работу фрикционных аппаратов при соударении грузовых вагонов. Кандидат техн. наук С. В. Вершинский исследовал соударение вагонов в случае полной осадки фрикционных аппаратов.

В реферируемой работе исследуется возможность упрощения вычислений продольных усилий при соударении экипажей с зазорами в упряжных приборах.

Работа состоит из введения и ~~четырёх глав~~ ~~двух глав~~

В первой главе рассмотрено соударение двух экипажей без зазоров и с зазорами в упряжи при различных жесткостях поглощающих аппаратов. Принято ~~упрощение~~ ~~допущение~~ что силовые

характеристики поглощающих аппаратов линейны. Процесс удара исследуется по этапам. Первым этапом удара  $\tau_1$  называем промежуток времени от начала удара до момента наибольшего сближения экипажей; вторым этапом удара  $\tau_2$  — промежуток времени от момента наибольшего сближения экипажей до конца удара.

Рассмотрены колебания экипажей при ударе, причем принято во внимание рассеивание энергии при треугольной петле гистерезиса и получена формула для определения наибольшего усилия.

В случае соударения экипажей с зазорами в упряжи после первых двух этапов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  следует третий этап удара  $\tau_3$ , в течение которого экипажи перемещаются один относительно другого на величину суммарного зазора в упряжи, не вызывая усилий; в течение этого времени каждый экипаж катится свободно, преодолевая лишь сопротивление движению. Этот вопрос также разобран аналитически. Принято во внимание рассеивание энергии и получены формулы для определения усилий на всем протяжении процесса до затухания колебаний.

Все результаты, полученные аналитически, сопоставлены с результатами опытов.

Опыты по соударению двух экипажей выполнены на моделях в лаборатории и с грузовыми вагонами на станциях. Стенд для ударных процессов представляет собой модель прямолинейного участка пути с 2-осными металлическими полувагончиками весом по 10 кг каждый. Полувагончики оборудовались автосцепками с поглощающими аппаратами трех типов: пружинными амортизаторами, пружинно-фрикционными амортизаторами с большим сухим трением и резиновыми амортизаторами с большим сухим трением. Процесс соударения вагончиков записывался на пленку осциллографом МПО-2. Усилия и взаимные перемещения вагончиков измерялись датчиками сопротивления.

Соударения грузовых вагонов производились на станциях Никополь, Запорожье-Левое Сталинской ж. д. и на желдорветке ДИИТа. Соударениям подвергались груженые полувагоны: 4-осные, весом по 82 т и 6-осные, весом по 123 т.

В работе производится аналитический расчет продольных усилий при соударении двух экипажей с зазорами и без зазоров в упряжи при различной жесткости поглощающих аппаратов и дается сравнение их с опытными данными.

Исследуются зависимости ударных усилий от начальной скорости соударяемых экипажей, от величины соударяемых масс и от жесткости поглощающих аппаратов.

В результате аналитических исследований и опытов на моделях и с вагонами можно сделать следующие заключения:

1. Относительные движения вагонов при соударении представляют собой затухающие колебания, амплитуды которых убывают в геометрической прогрессии.

2. Фрикционные поглощающие аппараты типа Ш-1-Т работают неплавно, часто заклиниваются и иногда после снятия нагрузки не возвращаются к первоначальному состоянию.

3. Силовые характеристики поглощающих аппаратов, основанные на сухом трении, отличаются большим непостоянством. С увеличением массы соударяемых экипажей и начальной скорости соударения динамическая жесткость увеличивается.

4. При скорости соударения выше  $5 \div 6$  км/час, при которой поглощающие аппараты типа Ш-1-Т закрываются, ударные усилия воспринимаются кузовом экипажа, продольная жесткость которого близка по величине к жесткости поглощающих аппаратов перед закрытием.

5. Зазоры в упряжных приборах не оказывают существенного влияния на максимальные усилия при соударении двух экипажей.

6. С увеличением начальной скорости соударения максимальные усилия растут быстрее, чем это следует из линейной теории удара.

7. Максимальные усилия при соударении двух экипажей, вычисленные по линейной теории удара, хорошо согласуются с опытными и расхождение между ними не превышает 10%. Это позволяет рекомендовать изложенный в работе метод расчета ударных усилий для использования в инженерной практике.

**Во второй главе** рассматривается удар одиночным вагоном по отцепу (группе вагонов) с зазорами в упряжных приборах. Аналитически рассматривается удар одиночным вагоном по отцепу из двух вагонов. Вагоны оборудованы автосцепками с фрикционными поглощающими аппаратами с зазорами в упряжи. Силовые характеристики поглощающих аппаратов принимаются линейными. Процесс соударения расчленяется на четыре этапа. 1-й этап—вагоны 1-й (ударяющий) и 2-й (ударяемый), нажимая друг на друга после сцепления, движутся в направлении к 3-му (ударяемому), но еще не касаются его. 2-й этап — отцеп из 1-го и 2-го вагонов коснулся 3-го вагона и нажимает на него, этап заканчивается в момент, когда усилие в I сечении (между 1-м и 2-м вагонами) достигает наибольшего значения. 3-й этап — вагоны 2-й и 3-й продолжают нажимать друг на друга; 1-й вагон отходит от 2-го вагона; этап оканчивается в момент, когда усилие во II сечении достигает наибольшего значения. 4-й этап — все три вагона дви-

жуются друг от друга; происходит отдача поглощающих аппаратов; этап оканчивается в момент, когда усилие в I сечении снова впервые станет равным нулю.

В первом этапе удара дифференциальное уравнение движения 1-го и 2-го вагонов приводится к виду

$$u_1 + v_1^2 u_1 = 0 \quad (1)$$

Усилие между этими вагонами будет

$$S_1 = \frac{k_1 v_0}{v_1} \sin v_1 t \quad (2)$$

Во втором этапе удара дифференциальные уравнения движения примут вид

$$\begin{aligned} u_1 + k_1 \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right) u_1 - \frac{k_2}{m_2} u_2 &= 0 \\ u_2 - \frac{k_1}{m_2} u_1 + k_2 \left( \frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3} \right) u_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Общее решение этих уравнений следующее

$$\begin{aligned} u_1 &= C_1 (n_2^2 - v_1^2) \sin (v_1 t + \alpha_1) + C_2 \frac{k_2}{m_2} \sin (v_2 t + \alpha_2) \\ u_2 &= C_1 \frac{k_1}{m_2} \sin (v_1 t + \alpha_1) + C_2 (n_1^2 - v_2^2) \sin (v_2 t + \alpha_2) \end{aligned} \quad (4)$$

Произвольные постоянные  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  определяются из начальных условий

$$\text{при } t = 0 \quad u_1 = u_{10}; \quad u_2 = 0.$$

$$u_1 = u_{10}; \quad u_2 = u_{20}$$

Усилия в сечениях I и II соответственно будут

$$\begin{aligned} S_1 &= k_1 u_1 \\ S_2 &= k_2 u_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично получены решения для усилий в последующих этапах.

Наибольшие усилия по расчету получены в конце 2-го этапа удара в I сечении.

Экспериментальные исследования выполнены на моделях в лаборатории и с грузовыми полувагонами на ж.-д. станциях. Количество вагонов в отцепках доводилось на стенде до 10 шт., а на станции — до 25 шт. В работе приводятся сравнение результатов аналитического решения с результатами опытов, как для моделей, так и для природы. Исследовались также зависимости продольных усилий от величины соударяемых масс, от

числа экипажей в отцепе и от начальной скорости соударения. Соударения записывались на пленку осциллографом МГО-2.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие заключения:

1. При соударении одиночного экипажа с отцепом относительное движение экипажей представляет собой также затухающие колебания.

2. Характер работы поглощающих аппаратов при соударении одиночного экипажа с отцепом остается таким же, как и при соударении двух экипажей.

3. Зазоры в упряжных приборах сжатых отцепов влияния на максимальные усилия при соударении не оказывают; в растянутых отцепках, благодаря зазорам, максимальные усилия несколько уменьшаются.

4. Во всех случаях наибольшие ударные усилия возникают в головном сечении, т. е. в сечении, в котором происходит удар одиночного экипажа по отцепу; по мере удаления сечений от места удара усилия уменьшаются и ни при каких условиях не достигают усилий головного сечения.

5. Интенсивность нарастания ударных усилий при увеличении числа экипажей в отцепе уменьшается; при увеличении числа экипажей в отцепе сверх 8-ударные усилия практически не увеличиваются.

6. Интенсивность нарастания наибольших ударных усилий при увеличении начальной скорости соударения практически одинакова для отцепов с различным числом экипажей в них и сравнительно близка к интенсивности при соударении двух экипажей.

7. Максимальные усилия при соударении одиночного экипажа с отцепом, вычисленные рассмотренным в работе методом, хорошо подтверждаются опытами и расхождение между ними, как правило, не превышает 10%.

В третьей главе рассмотрено соударение отцепов с зазорами в упряжных приборах. Исследования выполнены экспериментально на моделях в лаборатории и с грузовыми полувагонами на железнодорожных станциях. Исследования производились при следующих состояниях отцепов перед соударением: оба отцепа сжаты, оба отцепа растянуты, ударяющий отцеп сжат, ударяемый — растянут, ударяющий — растянут, ударяемый сжат, произвольное состояние отцепов и др.

На стенде в лаборатории исследовались соударения отцепов, составленных из 5 однотипных вагончиков весом по 10 кг каждый. Вначале рассматривается соударение отцепов при одинаковой начальной скорости. Усилия в отцепках замерялись в

пяти сечениях электрическими динамометрами. Испытывались отцепы без зазоров и с зазорами в упряжи.

Опыты по соударению отцепов в натуре производились на ст. Никополь Сталинской ж. д. Соударяемые отцепы составлялись из 12 груженных 4-осных полувагонов по 82 т каждый. Соударение осуществлялось путем накатывания электровозом ударяющего отцепа на неподвижно стоящий ударяемый отцеп. Начальная скорость соударения выдерживалась в пределах 3,5—6,0 км/час. На пленке осциллографом записывались: усилия в трех сечениях, перемещения фрикционного аппарата головного сечения, обороты колеса ударяющего отцепа и время.

По результатам исследований можно сделать заключения:

1. Процессы соударения отцепов, составленных из грузовых вагонов, хорошо моделируются на механическом стенде в лаборатории.

2. Наибольшие усилия при соударении одинаковых отцепов бывают только в головном сечении, т. е. в стыке двух отцепов. Распределение усилий по длине отцепов носит затухающий характер. Усилия в сечениях удаленных от головного никогда не достигают максимальных и, как правило, всегда меньше их.

3. Увеличение жесткости поглощающих аппаратов значительно увеличивает ударные усилия.

4. Зазоры в упряжных приборах не вызывают увеличения усилий при соударении отцепов и одиночных вагонов, чего не наблюдается при трогании поезда с места; зазоры даже несколько смягчают процесс соударения.

**В четвертой главе** рассматривается распространение ударной волны при торможении растянутых однородных грузовых поездов с зазорами в упряжи. В аналитическом исследовании применена элементарная теория соударения двух экипажей, изложенная в первой главе.

Принято, что тормозные устройства всех вагонов поезда одинаковы и работают на одном режиме. Кривая торможения существующих пневматических тормозов МТЗ-135 и М-320 аппроксимируется экспоненциальной кривой. Пользуясь понятием единичной функции  $\sigma_0(t)$  составлено выражение функции  $f(t)$ , которой описуется тормозная сила каждого вагона поезда

$$f(t) = w_0 mg \sigma_0(t) + f_0 mg \sigma_0(t - \tau_1) - f_1 mg [1 - e^{-\alpha(t - \tau_2)}] \sigma_0(t - \tau_2) \quad (9)$$

где:  $m$  — масса вагона;

$w_0$  — основное удельное сопротивление вагона;

$f_0$  — удельное сопротивление вагона от торможения скачком;

$f_1$  — полное удельное сопротивление вагона при торможении минус сопротивление  $f_0$ ;

$\tau_1$  — промежуток времени от момента появления скачка в первом вагоне до момента появления скачка в данном вагоне;

— промежуток времени от момента появления скачка в первом вагоне до момента начала интенсивного торможения в данном вагоне.

Дифференциальное уравнение движения одиночного вагона при торможении имеет вид

$$m\ddot{x} = -f(t) \quad (10)$$

и решается при начальных условиях

$$t=0, \quad x=0, \quad \dot{x}=v_0. \quad (11)$$

Решение уравнения (10) с учетом (9) и (11) будет

$$x(t) = v_0 t - \frac{w_0 g}{2} t^2 - \frac{f_0 g}{2} (t - \tau_1)^2 - f_1 g \left\{ \frac{1}{\alpha^2} \left[ 1 - e^{-\alpha(t-\tau_1)} \right] \right. \\ \left. - \frac{1}{2} (t - \tau_2)^2 - \frac{1}{\alpha} (t - \tau_2) \right\} \quad (12)$$

Из (12) путем дифференцирования получено уравнение скорости одиночного вагона при торможении.

Уравнения движения и скорости одиночного вагона при торможении годны до момента закрытия зазоров между вагонами. Эти уравнения положены в основу анализа процесса торможения растянутого поезда.

В однородных поездах тормозная волна и начало интенсивного торможения распространяются вдоль поезда по закону близкому к линейному. При торможении с локомотива торможение вагонов начинается с головы поезда; вагоны будут тормозиться последовательно друг за другом. В начале торможения абсолютные скорости вагонов в голове поезда станут меньше, чем в хвосте. Вагоны с достаточно большой скоростью накатятся на впереди идущие и ударят по ним. Зазоры в предварительно растянутом поезде при торможении закроются; закрытие зазоров, как правило, начнется с головы поезда. Относительные скорости смежных вагонов в хвосте поезда окажутся больше, чем в голове. В результате вагоны, начиная с головного, объединятся в одну группу, число вагонов в которой постепенно будет увеличиваться. Движение такой группы, в каждый данный момент следует рассматривать, как движение одиночного экипажа с центром масс, расположенным в середине группы. Силы взаимодействия вагонов в такой группе, как силы внутренние, не окажут влияния на движение вагонов при торможении. Относительные скорости одиночных вагонов, набегających на впереди идущую группу вагонов,

по мере удаления к хвосту поезда, будут увеличиваться. Пропорционально относительным скоростям будут расти и ударные усилия при торможении растянутого поезда. При торможении с локомотива наибольшие ударные усилия всегда следует ожидать в хвостовой трети поезда.

Таким образом, основной причиной ударов при торможении растянутых грузовых поездов являются, прежде всего, зазоры в упряжи, влияние которых будет тем большее, чем больше неравномерность торможения. При существующих пневматических тормозах со сравнительно невысокой скоростью бега тормозной волны (170—200 м/сек) зазоры в упряжи (доходящие до 10—12 см) могут привести к большим ударным усилиям при торможении.

Для инженерных расчетов интерес представляют верхние границы ударных усилий при торможении.

Аналитические вычисления ударных усилий при торможении растянутых поездов сводятся к следующему: 1) для каждого двух смежных вагонов при одинаковых значениях  $t$  и соответствующих этому времени значениях  $\tau_1$  и  $\tau_2$  вычисляются пути, проходимые каждым вагоном; 2) вычисляются абсолютные и относительные скорости каждого вагона; 3) по формуле линейной теории удара подсчитываются наибольшие усилия при накатывании вагонов друг на друга.

Наибольшие ударные усилия, полученные расчетом, сравнивались с данными из опытов.

По результатам экспериментальных и аналитических исследований можно сделать следующие заключения:

1. Ударные усилия при торможении могут возникать в растянутых поездах только с зазорами в упряжи. Ударные усилия вызываются зазорами в упряжи благодаря неодновременности начала торможения вагонов в поезде.

2. При торможении из кабин машиниста наибольшие ударные усилия всегда появляются в хвостовой трети поезда, т. е. в той части поезда, в которой позже наступит интенсивное торможение. При торможении с хвоста поезда наибольшие ударные усилия возникают только в предварительно сжатом поезде, в голове (между локомотивом и первым вагоном состава)

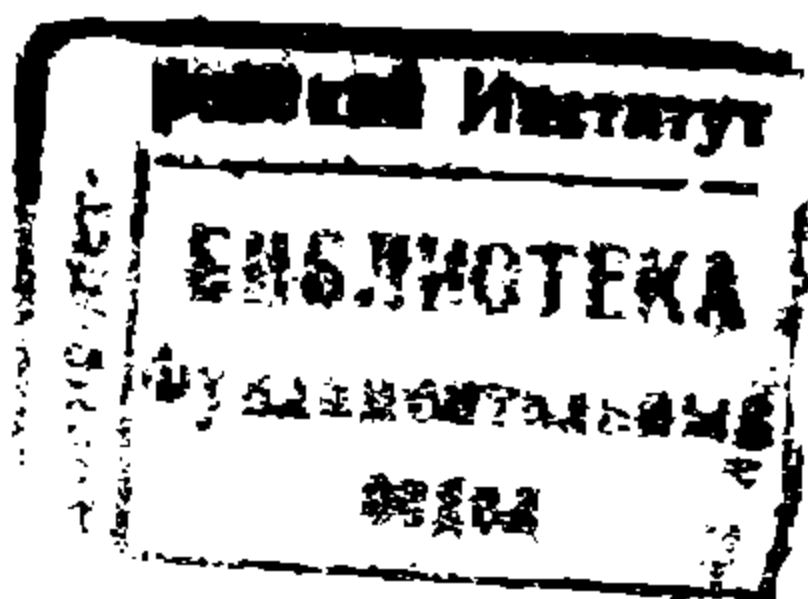
3. Увеличение длины поезда, уменьшение скорости поезда, при которой начинается торможение, уменьшение времени наполнения тормозных цилиндров, увеличение зазоров между вагонами увеличивает ударные усилия при торможении растянутого поезда.

4. Нижняя граница ударных усилий при торможении растянутого поезда может быть определена в предложении, что в соударении принимают участие только два экипажа; величина усилия рассчитывается по формуле линейной теории удара.

Верхняя граница ударных усилий определяется в предположении, что набегающий одиночный вагон соударяется с группой; ударные усилия при этом будут на  $20 \div 40\%$  больше, в зависимости от числа вагонов в группе и состояния поглощающих аппаратов. Заклинивание поглощающих аппаратов увеличивает ударные усилия.

5. Чем больше по величине зазоры между вагонами, тем позже будут группироваться вагоны, тем позже и с большей относительной скоростью, а следовательно, и с большими усилиями последует набегание хвостовых вагонов на впереди идущие. Чем большая разница в величине зазоров отдельных сечений поезда, тем большая вероятность образования отдельных групп вагонов внутри поезда.

6. Результаты аналитических вычислений ударных усилий при торможении растянутых поездов по методике, изложенной выше, вполне удовлетворительно подтверждаются опытами.



### Статьи, опубликованные автором по реферируемой работе

1. Бодянов П. С.—О продольных усилиях при соударении двух экипажей. Труды ДИИТа, вып. XXVI, Трансжелдориздат, 1958.

2. Бодянов П. С. — Экспериментальное исследование усилий при соударении отцепов. Труды ДИИТа, вып. XXVI, Трансжелдориздат, 1958.

---

БГ 02059. Выпуск 26-IV—1958 г. Бум. 62x82  $\frac{1}{16}$  Печ. лист. 0,56  
Днепропетровск. Типогр. отд. Трансжелдориздата, Зак. № 3099—110

НИБ  
ДНУЖТ