

Е. П. БЛОХИН, д.т.н., профессор, ДИИТ (Украина);

К. И. ЖЕЛЕЗНОВ, ст.н.с., ДИИТ (Украина);

Л. В. УРСУЛЯК, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);

Я. Н. РОМАНЮК, ДП ПКТЬ АСУ ЗТ (Украина)

О ВОЖДЕНИИ ДЛИННОСОСТАВНЫХ ПОЕЗДОВ

Надано опис можливостей розробленого обчислювального комплексу та його використання для розв'язання задач безпеки і стійкості руху.

С помощью математического моделирования рассмотрены безопасные способы вождения длинносоставных соединенных поездов.

The description of the developed computer software package and its use to solve problems of motion safety and stability is given.

В последние годы в странах с большими грузопотоками и малой пропускной способностью существенно увеличились длины грузовых поездов, в том числе таких, у которых локомотивы оказываются распределенными вдоль состава. В России в норму вошли соединенные поезда массой 12 тыс. тонн. В виде соединенных, но с меньшей массой стали вновь эксплуатироваться поезда на ряде направлений украинских железных дорог. Несмотря на внедрение систем автоведения, чаще всего вспомогательными локомотивами таких поездов управляют синхронно с головного локомотива. В случае неблагоприятного сочетания продольного профиля и режимов управления локомотивами в соединенных длинносоставных поездах, особенно неоднородных по массе, даже эксплуатационные режимы управления (набор тяги и регулировочные торможения) могут привести к разрыву автосцепных устройств, разрушению кузова или сходу с колеи грузового вагона.

Разрывы автосцепок могут происходить и при благоприятном сочетании профиля и плана пути и режимов управления локомотивами даже в поездах обычного формирования в случае пуска в ход или набора тяги в условиях, не отпущенных тормозов хвостовой части поезда. Такие явления особенно часто имеют место в зимних условиях, когда резиновые прокладки тормозной магистрали теряют эластичность и даже мощные компрессоры современных локомотивов не в состоянии поддерживать необходимое давление воздуха в хвостовой части поезда. Поэтому набор тяги в этих условиях следует производить медленно, а воздухораспределители состава должны быть отрегулированы так, чтобы тормозные нажатия хвостовой

части поезда не превосходили тех значений, которые присущи вагонам головной части поезда.

В процессе поиска причин разрыва автосцепок желательно использовать не только экспертные оценки специалистов, но и результаты лабораторных анализов металла разрушенных автосцепных устройств, которые необходимо проводить в связи с эффектом Баушингера, состоящем в том, что в сортировочном парке в условиях соударения вагонов со скоростями, как правило, значительно превышающими допускаемые, происходит наклеп автосцепок, который приводит к уменьшению предела текучести и предела прочности при появлении растягивающих усилий в автосцепках. Но кроме этого желательно использовать и методы математического моделирования движения рассматриваемых поездов.

В научно-исследовательской лаборатории динамики и прочности подвижного состава железных дорог ДИИТа разработан программный комплекс, с помощью которого можно исследовать продольную нагруженность грузовых и пассажирских поездов[1]. При изучении продольных колебаний поезда в основном исследуются переходные режимы, при которых учитывается влияния зазоров в межвагонных соединениях. При этом наиболее опасным является режим торможения, сопровождающийся появлением наибольших продольных нагрузок. При моделировании процессов торможения грузовых и пассажирских поездов и последующего отпуска использовались параметры автотормозов, полученные по результатам экспериментов в тормозной лаборатории ВНИИЖТа, а также по результатам многолетних, много-

численных экспериментальных исследований, проведенных с поездами в реальных условиях опытного кольца ВНИИЖТа (Москва) и ряда железных дорог Украины и России. Для проверки возможности использования указанных параметров автотормозов на этапе теоретических исследований продольной нагруженности грузовых и пассажирских поездов было проведено сопоставление результатов математического моделирования с результатами эксперимента.

В настоящее время грузовые вагоны в основном оборудованы фрикционными поглощающими аппаратами Ш-1-ТМ, а пассажирские вагоны упруго-фрикционными поглощающими аппаратами ЦНИИ-Н6. Фрикционные поглощающие аппараты грузовых поездов весьма нестабильны в работе. Силовая характеристика их может принимать совершенно различные формы и как правило далека от характеристики при статическом нагружении[2]. Силовая характеристика в процессе удара, который имеет место при движения поезда из-за наличия зазоров в упряжи, формируется в результате такого скольжения клиньев относительно корпуса аппарата, при котором имеют место чередующиеся «схватывания» трущихся поверхностей и «срывы», сопровождающиеся резким проскальзыванием клиньев при малой силе трения. Схватывания приводят к интенсивному нарастанию, а срывы – к сбросам силы, действующей на вагон. Все это позволяет считать, что грузовой поезд, вагоны которого оборудованы фрикционными поглощающими аппаратами, представляют собой стохастическую систему. Анализируя результаты многочисленных экспериментов, которые были проведены научно-исследовательской лабораторией динамики и прочности подвижного состава в различные годы, необходимо было определить такие параметры межвагонных соединений, которые позволят с достаточно большой вероятностью прогнозировать результаты экспериментов[3]. В разработанном программном комплексе были использованы так называемые интегральные характеристики для различных типов поглощающих аппаратов, в частности, Ш-1-ТМ и ЦНИИ-Н6. В качестве контролируемых параметров для грузовых поездов использовались продольные усилия, а для пассажирских – продольные ускорения.

Ниже с целью сопоставления результатов расчета и экспериментов приведены графики распределения по длине поезда максимальных значений продольных усилий и ускорений, по-

лученные опытным путем и с помощью математического моделирования. Расчеты выполнялись для различных видов торможения: экстренное и полное служебное торможения, а также регулировочное торможение с разрядкой тормозной магистрали на 0.7 атм.

При оценке наибольших в поезде продольных усилий рассматривался опытный грузовой поезд массой 10000 тонн, состоящий из 95-ти четырехосных грузовых вагонов массой 89 тонн, оборудованных композиционными тормозными колодками и двух локомотивов серии ВЛ-8, расположенных в голове и оборудованных чугунными тормозными колодками. Все экипажи поезда были оборудованы воздухо-распределителями №483 и фрикционными поглощающими аппаратами Ш-1ТМ. При этом воздухо-распределители вагонов были включены на средний, а локомотивов – на порожний режим работы. Измеренный средний зазор в межвагонных соединениях оказался равным 47мм. Начальная скорость торможения грузового поезда в опыте и при моделировании составляла 30км/ч.

На рис.1-3 представлены для сопоставления результатов расчета и эксперимента данные о распределении вдоль поезда максимальных значений продольных сил в различных сечениях состава при регулировочном, полном служебном и экстренном торможениях.

Ниже в таблице 1 приведены наибольшие в поезде значения продольных усилий соответствующие рассмотренным режимам торможения грузового поезда массой 10000 тонн.

Из таблицы 1 видно, что в рассматриваемых случаях расхождение значений наибольших в поезде усилий, найденных экспериментально и путем моделирования не превысило 14%.

Результаты теоретических расчетов чаще всего используются для оценки того, что на самом деле происходит в реальном объекте. Попытаемся найти соотношение между наибольшими значениями в поезде продольных усилий, найденных в реальных условиях при торможении и полученных расчетным путем.

Как показывают результаты многочисленных расчетов, теоретические оценки, как правило, близки к средним наибольшим значениям для серии опытов, образующих выборку достаточного объема (например, при ПСТ наибольшее значение продольной силы составляло - 1570 кН). Например, для серии из нескольких опытов по полному служебному торможению (рис.4) с начальной скорости движения 30 км/ч рассматриваемого выше поезда максимальное

Таблица 1

Виды торможений	S, кН		расхождение
	расчет	опыт	
Ст-0.7 атм	-1130	-1230	8%
ПСТ	-1360	-1570	14%
ЭТ	-1725	-1780	3%

значение наибольшей продольной силы достигало приблизительно -1750 кН. Полученное значение приблизительно в 1,25 раза превышает расчетное значение наибольшей в поезде продольной силы (-1360 кН). На приведенном рисунке точками изображены опытные значения усилий, линией – результаты расчета. В дальнейшем будем использовать это соотношение (1.25) в тех случаях, когда по результатам теоретических исследований необходимо оценить ожидаемую в реальных условиях торможения величину наибольшей в поезде продольной силы.

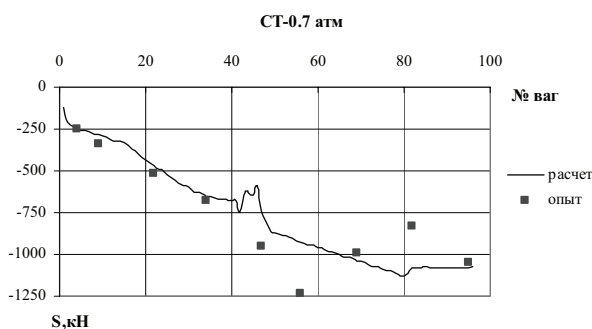


Рис.1. Распределение максимальных значений продольных усилий при регулировочном торможении поезда массой 10000 тонн.

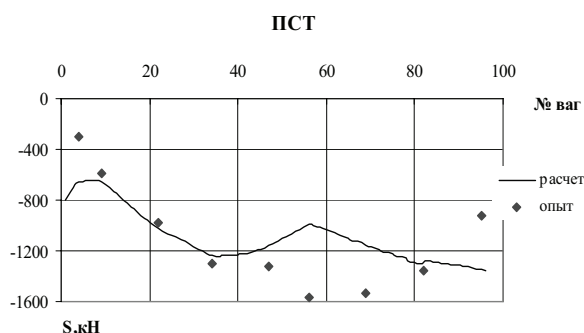


Рис.2. Распределение максимальных значений продольных усилий при полном служебном торможении поезда массой 10000 тонн.

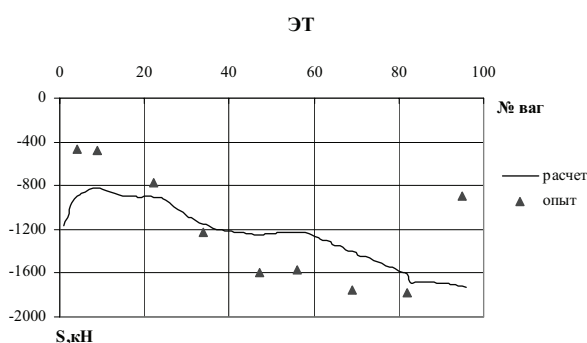


Рис.3. Распределение максимальных значений продольных усилий при экстренном торможении поезда массой 10000 тонн

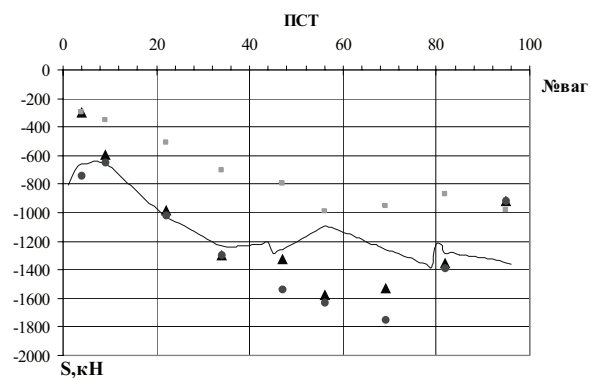


Рис.4. Распределение максимальных значений продольных усилий по длине грузового поезда массой 10000 тонн при полном служебном торможении со скорости 30 км/ч.

Разработанный программный комплекс может быть использован также для оценки наибольших продольных ускорений в пассажирских поездах разной длины, оборудованных различными поглощающими аппаратами.

Для оценки наибольших продольных ускорений рассматривались различные виды торможения со скорости 10 км/ч опытного пассажирского поезда, состоящего из локомотива серии ЧС-2 и 36 вагонов, оборудованных композиционными тормозными колодками и упруго-фрикционными поглощающими аппаратами ЦНИИ-Н6. Средний зазор в опытном поезде равнялся 45мм. При экстренном торможении рассматривались также различные режимы работы воздухораспределителей №292- длинно-составный и короткосоставный. При регулировочном и полном служебном торможении предполагалось, что воздухораспределители включены на длинносоставный режим работы.

Ниже на рис.5-8 изображены графики распределения по длине пассажирского поезда максимальных значений продольных ускорений в долях «g», полученные с помощью математического моделирования (сплошные линии) и опытным путем (маркеры) для различных видов торможений.

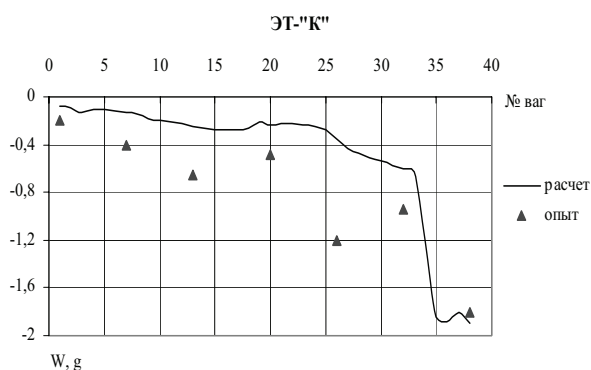


Рис.5. Распределение максимальных значений продольных ускорений по длине пассажирского поезда при экстренном торможении с воздухораспределителями №292, включенными на короткосоставный режим.

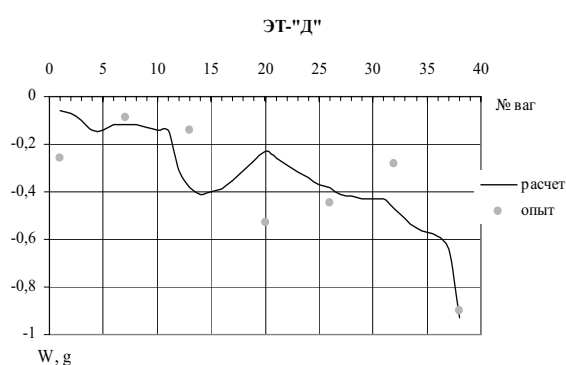


Рис.6. Распределение максимальных значений продольных ускорений по длине пассажирского поезда при экстренном торможении с воздухораспределителями №292, включенными на длинносоставный режим.

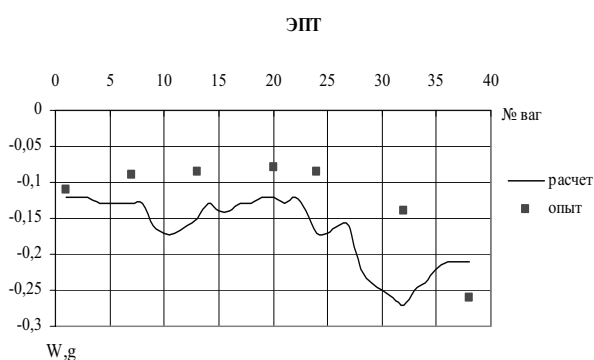


Рис.7. Распределение максимальных значений продольных ускорений по длине пассажирского поезда при электропневматическом торможении.

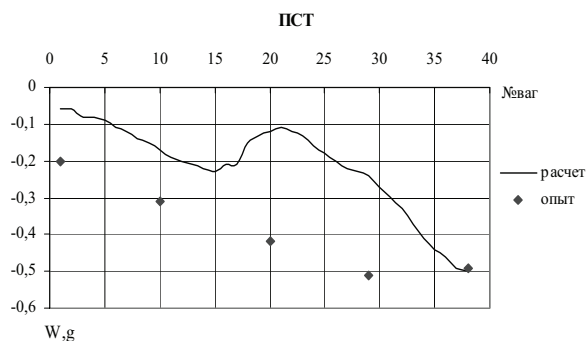


Рис.8. Распределение максимальных значений продольных ускорений по длине пассажирского поезда при полном служебном торможении.

Ниже в таблице 2 приведены значения наибольших продольных ускорений в долях «g» для рассматриваемых режимов торможения, полученные экспериментально и с помощью математического моделирования.

Таблица 2

Виды торможений	W, g		расхождение
	расчет	опыт	
ЭПТ	-0,27	-0,26	4%
ЭТ-«К»	-1,9	-1,8	6%
ЭТ-«Д»	-0,93	-0,9	4%
ПСТ	-0,5	-0,49	2%

Как видно из приведенной таблице расхождения между наибольшими значениями продольных ускорений, полученных опытным и расчетным путем не превысили 6%.

При исследовании режимов торможения следует оценивать также тормозные пути, которые необходимо учитывать в случае движения по участку пути имеющему ограничения по скорости движения. Ниже в таблицах 3 и 4 приведены значения тормозных путей, полученных при различных видах торможения для рассмотренных выше грузовых и пассажирских поездов.

Таблица 3.

Значения тормозных путей при различных видах торможений грузового поезда массой 10000 тонн со скорости 30 км/ч.

Виды торможений	Тормозной путь (L), м		расхождение
	расчет	опыт	
Ст-0.7 атм	292	260	13%
ПСТ	180	170	6%
ЭТ	154	150	3%

Таблица 4.

Значения тормозных путей при различных видах торможений пассажирского поезда, оборудованного чугунными тормозными колодками со скорости 10 км/ч .

Виды торможений	Тормозной путь (L),м		расхождение
	расчет	опыт	
Ст-0.7 атм	29	31	7%
ЭПТ ПСТ	16	15	7%
ПСТ	23	23	0%

Анализ приведенных исследований показывает, что результаты решения задач, полученные путем численного интегрирования дифференциальных уравнений движения поезда, вполне удовлетворительно (погрешность не более 15%) согласуются с результатами экспериментов. Это позволяет считать, что построенная математическая модель и ее программная реализация довольно близко отображают процессы, имеющие место при переходных режимах движения поезда.

При регулировочных торможениях длинно-составных соединенных поездов (второй локомотив расположен в середине состава) наблюдаемые в опытах наибольшие значения растягивающих сил могут превосходить на 20% величины продольных нагрузок (1 МН), допускаемых для III расчётного режима. Естественно такие часто повторяющиеся значения продольных усилий могут привести к разрыву автосцепок, особенно в неоднородных длинносоставных грузовых поездах. Такие случаи даже в длинносоставных поездах, сформированных согласно пункта 15.32 ПТЭ имели место на некоторых железных дорогах Украины. Выясним причины произошедших инцидентов с помощью предлагаемого вычислительного комплекса.

Ниже с помощью математического моделирования исследованы продольные усилия в длинносоставном объединенном неоднородном поезде, состоящем из 2-х локомотивов ВЛ-8, 60-ти груженых вагонов массой 92 тонны и длиной 12 метров и 64-х порожних четырехосных вагонов массой 22 тонны и длиной 14 метров. Второй локомотив ВЛ-8 располагался после груженых вагонов. Рассматривались регулировочные торможения описанного поезда со скорости 50 км/ч на участке пути, схема которого приведена на рис.9.

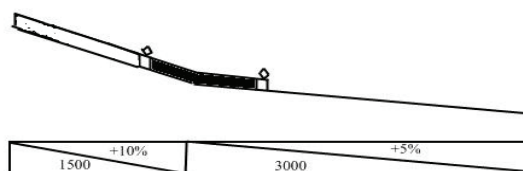


Рис.9. Схема профиля пути.

При исследовании продольных усилий предполагалось, что вагоны оборудованы композиционными тормозными колодками. Воздухораспределители загруженных вагонов включены на средний, а порожних вагонов на порожний режим работы. Моделируя движение поезда предполагалось, что оба локомотива тормозными средствами управляли синхронно по следующей схеме: торможение только локомотивными тормозами, соответствующее III положению прямодействующего тормоза, через 400 метров движения – головной локомотив начал пневматическое торможение с разрядкой тормозной магистрали 1 атм, а вспомогательный локомотив – с разрядкой 0,7 атм. Для сравнения рассматривался вариант, который имел место в реальных условиях, когда в груженой части состава равномерно по длине было выключено 13 воздухораспределителей, а также когда снижение скорости осуществлялось только тормозами состава с указанной выше величиной разрядки тормозной магистрали. В качестве примера на рис.10 приведены распределения наибольших продольных усилий по длине поезда для описанных выше вариантов. Линии 1 соответствуют растягивающим и сжимающим усилиям для случая выключения части воздухораспределителей, линии 2, 3 – соответствуют варианту, когда все воздухораспределители были включены. При чем линией 3 обозначены максимальные продольные сжимающие и растягивающие усилия, полученные в результате применения только пневматических тормозов.



Рис.10. Распределение по длине поезда максимальных значений продольных усилий для различных способов регулировочных торможений.

Как видно из приведенных графиков, даже при регулировочных торможениях сдвоенных соединенных поездов, особенно неоднородных по массе, могут возникать усилия превышающие 1,0 МН. Опасные значения усилий были достигнуты, когда в грузовой части поезда были отключены 13 воздухораспределителей. Включение всех воздухораспределителей снижает уровень наибольших растягивающих сил на 15%. Снижение скорости движения на рассматриваемом участке пути только пневматическими тормозами состава (без предварительного включения тормозов локомотива) позволяет снизить уровень максимальных растягивающих продольных усилий примерно на 50%, а сжимающих – примерно на 15%.

В качестве сравнения на рис.11 изображены графики распределения наибольших продольных сил по длине предварительно растянутого рассматриваемого поезда для экстренного торможения со скоростью 50 км/ч. При этом оценены усилия для случаев, когда в грузовой части поезда равномерно по длине были выключены 13 воздухораспределителей (линия 1 на рис.11) и когда все воздухораспределители работали.

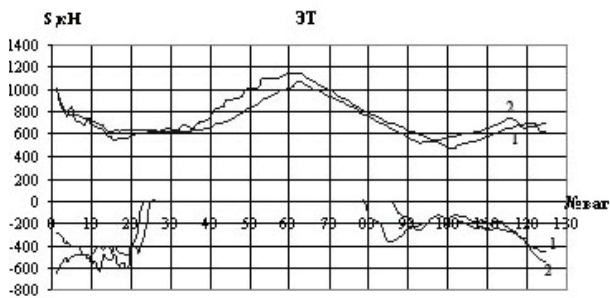


Рис.11. Распределение по длине поезда максимальных значений продольных усилий при экстренном торможении.

Из приведенного рисунка следует, что выключение части воздухораспределителей в грузовой части состава также приводит к росту растягивающих усилий, особенно в хвостовой части грузевого состава.

Появление опасных растягивающих продольных усилий связано с различной тормозной эффективностью грузовой и порожней частей состава, которая получена в связи с разным режимом работы воздухораспределителей. Отключение же нескольких воздухораспределителей в первой половине состава усиливает этот эффект.

Следует отметить, что полученный уровень усилий может меняться в зависимости от продольного профиля пути. В результате прове-

денных численных экспериментов с описанным выше поездом уровень растягивающих сил на площадке снизился на 20%, а на сложном переvallистом профиле, когда поезд длиной 1676 метров может располагать на различных уклонах пути – уровень сил может увеличиться на 35 %.

В случае синхронного торможения головным и вспомогательным локомотивами одинаковой разрядкой тормозной магистрали величиной 1,0 амт после применения прямодействующего тормоза локомотива, уровень наибольших усилий, может вырасти примерно на 40% и, будет достигать опасных значений даже при всех включенных воздухораспределителях. Это связано с тем, что тормозной коэффициент порожних вагонов значительно превышает указанный параметр грузевого вагонов и приводит к появлению растягивающих усилий способных разорвать автосцепное устройство.

Снижение уровня наибольших продольных сил в случае отключения части воздухораспределителей грузовой части поезда может быть достигнуто также при более позднем включении пневматических тормозов в порожней части поезда. Например, если начало торможения ступеню с разрядкой магистрали 0.7 амт вспомогательным локомотивом происходило спустя 4с после начала торможения III-ей ступеню (разрядка магистрали 1,0 атм) головным локомотивом, то уровень наибольших растягивающих усилий уменьшался на 25%.

Как следует из проведенных исследований продольной нагруженности длинносоставных соединенных поездов неоднородных по массе, (в головной части состава расположены грузе-ные вагоны, а во второй половине состава – порожние вагоны, воздухораспределители, которых включены на различный режим работы) выключение части воздухораспределителей в грузовой части поезда приводит к увеличению уровня растягивающих продольных усилий и может достигать опасных значений, особенно при неблагоприятном сочетании продольного профиля пути и режимов управления рассредоточенными локомотивами.

Наряду с этим следует отметить, что такой способ снижения тормозной эффективности (выключение части воздухораспределителей) дает положительный результат при торможении тяжеловесных однородных поездов. В результате многочисленных экспериментальных и теоретических исследований показано, что при торможении однородных поездов массой более 8 тыс. тонн в случае установки локомо-

тивов только в голове поезда снижение тормозной эффективности за счет выключения части воздухораспределителей равномерно по длине поезда позволяет существенно снизить уровень продольных сжимающих усилий при торможении[4].

Ниже в качестве примера на рис.12 приведены зависимости наибольших сжимающих усилий и тормозных путей от коэффициента тормозной эффективности в грузовом поезде, состоящем из 150 вагонов массой 100 тонн. Тормозная эффективность характеризуется коэффициентом $k=a/v$, «а» – количество включенных воздухораспределителей в группе из «в» вагонов. При $k = 1$ эффективность соответствует включению всех воздухораспределителей на среднем режиме работы. Сплошные линии соответствуют значениям наибольших сжимающих усилий при экстренном (линия 1) и полному служебному (линия 2) торможениям, а пунктирные – значениям тормозных путей со скорости 30 км/ч.

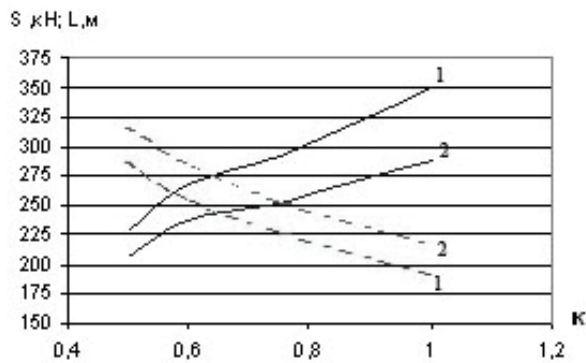


Рис.12. Зависимости наибольших сжимающих усилий и тормозных путей от величины тормозной эффективности «к» в грузовом поезде массой 15 тыс. тонн.

Из приведенного рисунка следует, что при уменьшении тормозной эффективности снижается уровень продольных усилий, но увеличивает тормозные пути. Это может привести к снижению скорости движения. Однако при этом может быть получен выигрыш в провозной способности, например, в случаях существенной неравномерности потока поездов, необходимости предоставления «окон» для текущего ремонта пути, контактной сети и т.д. Значительный выигрыш в провозной способности участка может быть получен, если оборудовать его усовершенствованной системой сигнализации, которая позволяет реализовать максимальную скорость движения при увеличенных тормозных путях.

С помощью численных экспериментов определено значение коэффициента тормозной

эффективности, при котором уровень наибольших продольных сил не превышал 2500 кН. Рассматривались грузовые поезда, состоящие из 4-хосных полувагонов массой 100 тонн, которые оборудованы включенными на средний режим работы воздухораспределителями № 483, пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами Ш-1-ТМ и композиционными тормозными колодками. Зазоры в межвагонных соединениях принимались равными 65 мм. На рис.13 изображена зависимость рекомендуемого значения коэффициента тормозной эффективности k от массы поезда.

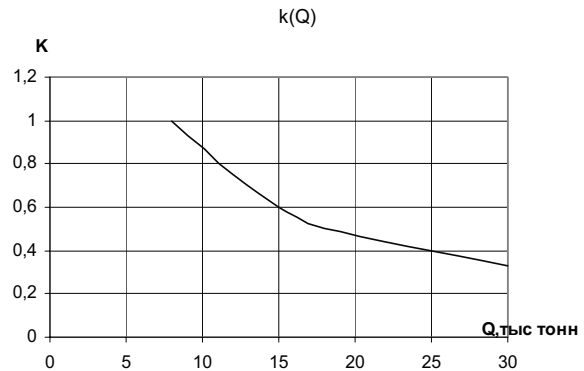


Рис.13. Зависимость рекомендуемых значений тормозной эффективности от массы поезда.

На рис.14 приведены значения тормозных путей для рассматриваемых поездов и рекомендуемой тормозной эффективности при экстренном торможении со скорости 60 км/ч.

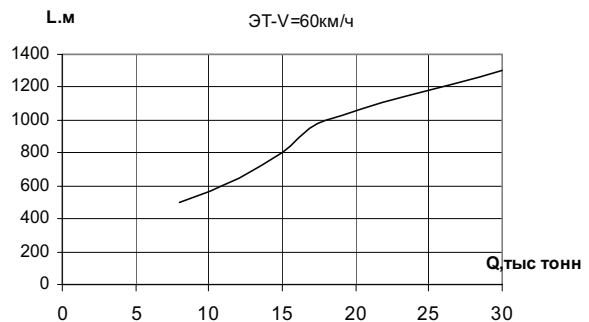


Рис.14. Зависимость тормозных путей при экстренном торможении со скорости 60 км/ч от массы поезда для рекомендуемых значений тормозной эффективности.

Как следует из приведенных рисунков при вождении поездов массой более 12 тыс. тонн с установкой локомотивов только в голове состава рекомендованный способ снижения тормозной эффективности за счет выключения части воздухораспределителей позволяет существенно снизить продольную нагруженность поездов. Скорость движения при этом должна быть

установлена по условиям безопасности в соответствии с данными, приведенными на рис. 14.

Рассмотренный прием уменьшения продольной нагруженности был использован при пропуске поезда массой 43 тыс. тонн по Целинной железной дороге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин, Е. П. Вычислительный комплекс для решения задач безопасности и устойчивости движения подвижного состава железных дорог [Текст] / Е. П. Блохин, Л. В. Урсуляк, К. И. Железнов // Вісник ДІТУ. – Вип. 18. – Д., 2007. – С. 106-114.

2. Коломийченко, В. В. Автосцепное устройство подвижного состава [Текст] / В. В. Коломийченко, Н. Г. Беспалов, Н. А. Семин. – М.: Транспорт, 1980. – 185 с.
3. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) [Текст] / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
4. Об одном возможном способе безопасного вождения тяжеловесных грузовых поездов [Текст] / Е. П. Блохин и др. // Вестник ВНИИЖТа. – 1987. – № 4. – С. 107-112.

Поступила в редколлегию 08.09.2009