

УДК 629.4:004.94

П. А. САХАРОВ, старший преподаватель, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ В ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДАХ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ПЕРЕЛОМЫ ПРОФИЛЯ ПУТИ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Исследованы продольные силы в межвагонных соединениях поезда, движущегося через переломы продольного профиля пути в режиме электрического торможения. Оценено влияние расположения порожних вагонов в составе и переломов профиля пути на величину максимальных сил в автосцепках вагонов. Представлены зависимости изменения сил в межвагонных связях при различных вариантах действия тормозной силы.

С развитием железнодорожного транспорта общей тенденцией является увеличение массы грузовых составов и скоростей движения поездов. Совершенствование конструкции локомотивов и автосцепных устройств вагонов, увеличение мощности тягового подвижного состава позволяют формировать составы большой массы и длины. Ведение тяжеловесных и длинносоставных поездов связано с рядом сложностей, и одной из них является обеспечение устойчивости движения. При нестационарных режимах движения в межвагонных соединениях поезда возникают колебания, приводящие к росту продольных сил, которые могут стать причиной схода вагонов с рельсов. Наиболее опасными являются случаи движения через переломы продольного профиля пути в режиме торможения. На Белорусской железной дороге по причине схода подвижного состава с рельсов при электродинамическом торможении его использование ограничено. Это приводит к увеличению расходов, связанных с износом тормозных колодок, колесных пар вагонов, возникающих вследствие необходимости использования пневматических тормозов поезда при движении на затяжных спусках. Упускается возможность экономии электроэнергии путем ее рекуперации электроподвижным составом. Поэтому необходимо исследовать устойчивость движения поездов при электрическом торможении локомотивом.

Изучение вопросов движения поезда получило новый виток развития в связи с внедрением компьютерных технологий, позволяющих рассчитывать сложные дифференциальные уравнения математических моделей поезда. Появляются и совершенствуются специализированные программы моделирования поездов, увеличивается число учитываемых моделями факторов. Некоторые программные комплексы учитывают в расчетах статистическую информацию, полученную на практике, при экспериментальных исследованиях. Так, в работе [1] акцентируется внимание на необходимости исследования эмпирическими методами устойчивости подвижного состава против схода от вкатывания гребней колес на рельсы. Высказывается мнение, что следует учитывать значительный опыт на базе многочисленных экспериментальных исследований воздействия подвижного состава на путь не по отдельности, а в их вероятностном сочетании. Приводятся статистические данные по результатам экспертных технических заключений о причинах крушений и аварий. Анализ этих данных показывает, что подавляющее большинство сходов подвижного состава происходило при движении по переходным и кривым

кривым. Результаты проведенных экспертиз свидетельствуют, что максимальные продольные силы в поезде при этом находились в пределах 200–400 кН.

Торможение поезда в кривых участках пути рассмотрено в работе [2]. На основании результатов расчетов авторами сделан вывод, что при торможении состава на криволинейных участках пути имеют место явления, которые невозможно исследовать с помощью модели поезда в виде одномерной цепочки твердых тел, соединенных нелинейными связями. Для такого случая предлагается использовать пространственную модель колебаний поезда, представленную в работе. Анализ результатов моделирования показал важность соблюдения норм установки автосцепных устройств, обеспечивающих необходимый угол их свободного поворота, для обеспечения безопасности движения в режиме торможения.

Влияние длины поезда и скорости его движения на продольную динамику при использовании пневматических тормозов рассмотрено в работе [3]. Полученные на основе моделирования движения поезда в программе MATLAB результаты свидетельствуют о резком увеличении продольных сил в межвагонных соединениях поезда при увеличении его длины и снижении скорости движения.

Наиболее сложным является управление движением тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов. Исследование продольной нагруженности наливных поездов массой свыше 10 тыс. тонн при торможении позволило сформулировать вывод о необходимости оснащения поезда системой синхронного торможения с резервной системой по тормозной волне [4]. При формировании таких поездов установка локомотивов должна производиться в голове и на расстоянии 1/3 длины от хвоста поезда. Как показали исследования [5], максимальные продольные силы зависят от режима работы воздухораспределителей. Так, при переводе их с грузевого режима на средний усилия в межвагонных соединениях уменьшаются на 7 % при экстренном, на 11 % при полном служебном и на 30 % при регулировочном торможении. Для уменьшения продольных сил в автосцепках вагонов тяжеловесных и длинносоставных поездов их рекомендуется оснащать поглощающими аппаратами с нежесткими силовыми характеристиками [6].

Эффективность применения перспективных фрикционных поглощающих аппаратов для снижения продольных сил при переходных режимах движения поезда рассмотрена в работе [7]. Результаты исследований показали, что при торможении поездов различной массы

вероятность возникновения критических сил и параметрического отказа у перспективных поглощающих аппаратов ниже, чем у серийных. Применение высокоэнергоемких полимерных и эластомерных поглощающих аппаратов приводит к снижению продольных нагрузок по сравнению с фрикционными амортизаторами, дает возможность уменьшить повреждения вагонов и грузов в эксплуатации, а также избежать сходов с рельсов вагонов и крушений поездов [8].

Рост продольных сил в межвагонных соединениях поезда наблюдается при наличии порожних вагонов в составе и расположении их в первой половине длины поезда. Неоднородность состава по массе может привести к увеличению максимальных сил при электрическом торможении локомотивом до 20 % [9]. К наибольшему росту приводит формирование составов с расположением порожних вагонов группами в голове и центральной части поезда. В данном случае возникают также наибольшие боковые и рамные силы, что является наиболее неблагоприятным с точки зрения устойчивости вагонов против выжимания [10]. При торможении наливных поездов, не однородных по типу вагонов-цистерн (4- и 8-осных), продольные силы снижаются в зависимости от уровня недолива на 17–35 % при расположении 8-осных цистерн в голове состава [11].

Исследование динамики поезда с помощью компьютерного моделирования нашло отражение в новой технологии TDEAS (train dynamics and energy analyser/train simulator), разработанной в Китае. Программа производит расчет продольной динамики поездов большой массы и длины с учетом энергетических параметров их систем [12]. Энергия поезда представляется в виде восьми составляющих, учет которых позволяет не только рассчитать возникающие в межвагонных соединениях силы, но и оценить возможность регенерации энергии при рекуперативном торможении. Результаты исследований показали возможность возврата электрической энергии при рекуперации до 40 %.

При сравнительной оценке результатов моделирования продольной динамики поезда специализированными симуляторами LTD (longitudinal train dynamics) различных производителей установлено, что во всех случаях наблюдается хорошая сходимость результатов, касающихся скорости движения поездов, сил тяги и сопротивления движению, влияния уклонов профиля пути. Основные различия выявлены в характеристиках поглощающих аппаратов межвагонных соединений, их нагрузочных характеристиках, значениях максимальных продольных сил [13].

Целью исследований является определение продольных динамических сил в межвагонных соединениях грузовых поездов при движении в режиме электродинамического торможения через переломы продольного профиля пути.

На основании математического описания движения поезда, приведенного в [9], построена компьютерная модель в программном комплексе MSC.ADAMS (рисунок 1). Модель предназначена для исследования продольной динамики поезда, состоящего из соединенных упругими связями без зазоров вагонов, представляющих собой абсолютно твердые тела, движущиеся прямолинейно без вертикальных колебаний и угловых перемещений.

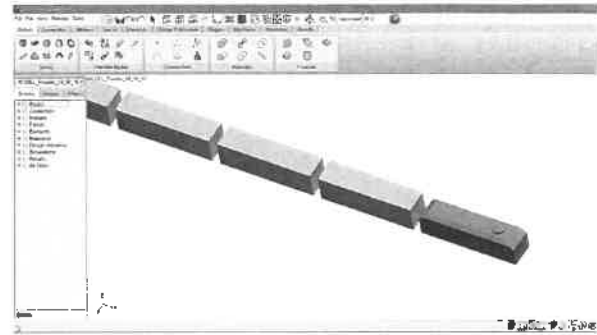


Рисунок 1 – Компьютерная модель поезда

Электрическое торможение применяют при движении по спускам (особенно затяжным) для поддержания скорости движения. Согласно источнику [14], на спусках крутизной менее 18 ‰ в грузовых поездах перевод электровагона на режим электрического торможения разрешается производить без применения автотормозов состава. По данной причине для исследований принят участок пути со спуском –17 ‰, схема которого представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема участка пути

Согласно проведенным исследованиям [15], при анализе движения поезда через переломы продольного профиля пути в режиме торможения необходимо рассмотреть динамические процессы, происходящих в упругих элементах поезда при движении через переломы на холстом ходу. При этом изменение продольных сил по длине поезда зависит главным образом от разности уклонов смежных элементов профиля, которые для рассматриваемого случая составляют 17 ‰. На рисунке 3 приведено пять различных схем формирования состава из 100 однотипных вагонов длиной по осям автосцепок 13,92 м каждый, рассмотренных при моделировании. Во всех случаях масса состава одинаковая, равная 7000 т.

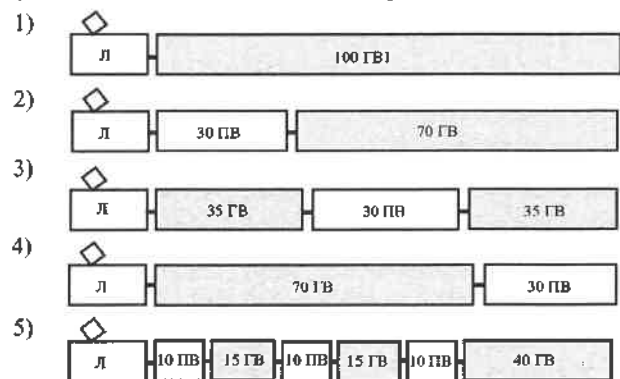


Рисунок 3 – Схемы формирования составов:
Л – локомотив; ГВ1 – грузный вагон массой 70 т; ГВ – грузный вагон массой 89,7 т; ПВ – порожний вагон массой 24 т

Рассмотрено движение поезда в режиме выбега через перелом продольного профиля пути с разностью уклонов 17 ‰ с начальной скоростью 80 км/ч. Расположение грузных и порожних вагонов и их массы соответствуют схемам, приведенным на рисунке 3. Коэффици-

циенты жесткости и демпфирования межвагонных связей во всех случаях одинаковы и равны соответственно $c = 1,1 \cdot 10^7$ Н/м, $K = 2 \cdot 10^6$ Н·с/м. Полученные при моделировании графики распределения максимальных сил по длине поезда представлены на рисунке 4.

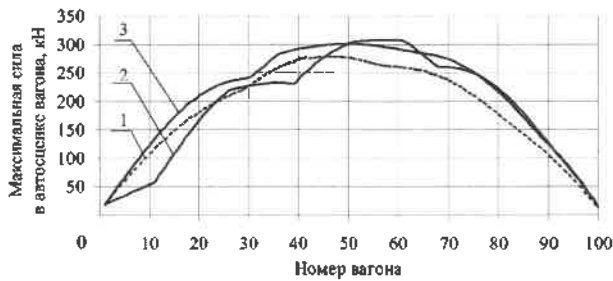


Рисунок 4 – Распределение максимальных сил в поезде при движении на холостом ходу для схем формирования составов: 1 – № 1; 2 – № 5; 3 – № 3

На основании данных графиков можно заключить, что для составов большой протяженности и массы при движении через перелом профиля с разностью уклонов 17 ‰ в режиме выбега максимальные продольные силы могут превышать 300 кН. Наибольшие силы возникают в случаях расположения порожних вагонов в центре поезда или группами в голове и центре (схемы 3 и 5).

Для оценки влияния профиля пути на продольные силы поезда в момент перехода в режим торможения следует изучить влияние неоднородности составов по массе на эти силы. С этой целью рассмотрено изменение максимальных сил, возникающих в автосцепках поезда после начала действия тормозной силы локомотива 300 кН при движении по прямому горизонтальному участку пути и через перелом продольного профиля. Графики представлены на рисунках 5 и 6.

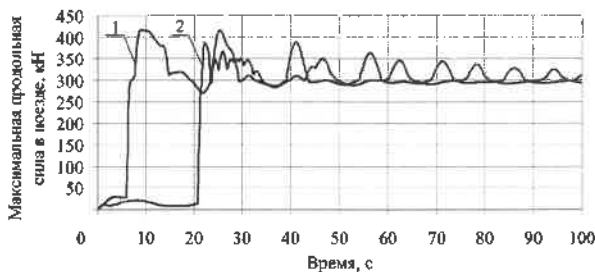


Рисунок 5 – Изменение максимальных сил в движущемся по площадке поезде для схем формирования составов: 1 – № 2; 2 – № 5

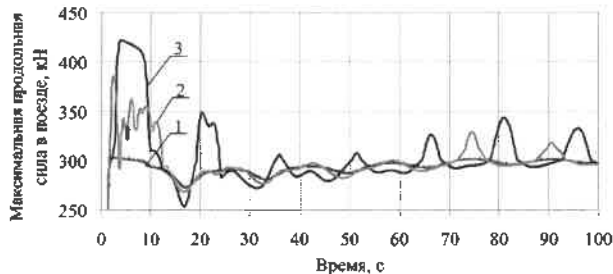


Рисунок 6 – Изменение максимальных сил в движущемся через перелом профиля поезде для схем формирования составов: 1 – № 1; 2 – № 5; 3 – № 2

Наибольшие силы превысили силы торможения на 39 и 28 % при формировании поездов по схемам 2 и 5 соответственно, что соответствует приведенной в [9–11] информации. Сравнение представленных графиков показывает, что характер изменения продольных сил в поез-

дах при движении по площадке сохраняется и для случая движения через перелом. В последнем случае к силам продольных упругих колебаний в межвагонных соединениях, вызванных действием тормозной силы, добавляется влияние перелома профиля пути.

С помощью компьютерной модели исследовано изменение продольных сил в автосцепках поезда при движении с площадки на спуск –17 ‰ в режиме электрического торможения. На рисунке 7 представлены зависимости сил в 50-м межвагонном соединении неоднородного поезда для случаев различного положения локомотива на участке в момент начала действия тормозной силы.

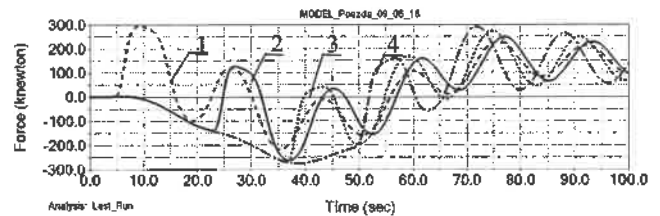


Рисунок 7 – Силы в 50-м межвагонном соединении поезда, сформированного по схеме 5 при времени начала торможения: 1 – 3 с; 2 – 21 с; 3 – 35 с; 4 – 48 с

Согласно рисунку в период движения поезда с площадки на спуск в режиме торможения локомотивом (пока части поезда находятся на элементах разной крутизны) в его межвагонных соединениях возникают упругие продольные колебания. При этом в одних и тех же межвагонных соединениях со временем происходит чередование сил сжатия и растяжения, что может оказывать негативное воздействие на движение при наличии больших зазоров в автосцепных устройствах.

Для снижения максимальных продольных сил сжатия при торможении движущегося на спуск поезда следует тормозную силу увеличивать плавно с той же скоростью, с которой изменяется сила воздействия со стороны профиля. Для случаев формирования составов 2 и 5 исследовано изменение продольных сил по длине поезда для вариантов резкого изменения тормозной силы и ее плавного увеличения, пропорционального влиянию профиля пути. На рисунках 8–10 представлены результаты расчетов.

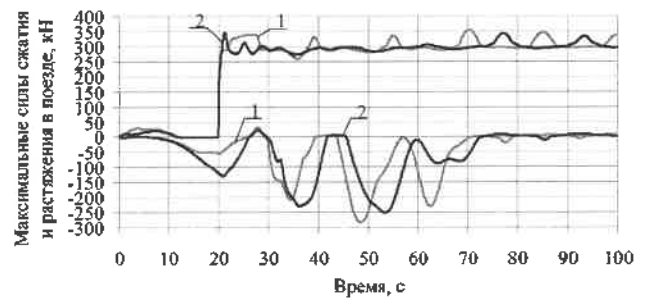


Рисунок 8 – Изменение максимальных сил в поезде при резком росте тормозной силы для схем формирования составов: 1 – № 2; 2 – № 5

Анализ полученных результатов показал, что при плавном увеличении тормозной силы со скоростью, равной скорости роста сил растяжения от действия перелома профиля пути, максимальные сжимающие и растягивающие усилия в межвагонных связях значительно уменьшаются. Силы сжатия в этом случае не превышают тормозных сил независимо от расположения порожних вагонов. Также можно отметить сниже-

ние амплитуды упругих продольных колебаний в поезде (см. рисунок 10).

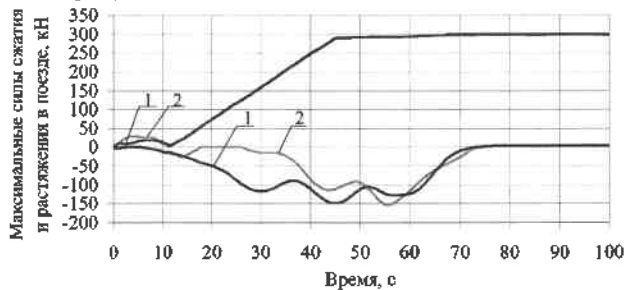


Рисунок 9 – Изменение максимальных сил в поезде при тормозной силе, изменяющейся пропорционально влиянию профиля, для схем формирования составов: 1 – № 5; 2 – № 2

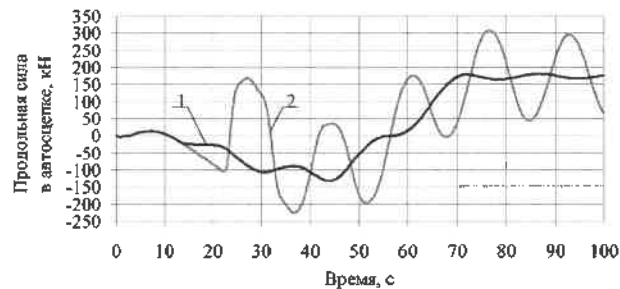


Рисунок 10 – Изменение сил в 50-м межвагонном соединении поезда при движении через перелом профиля при торможении: 1 – плавное; 2 – резкое

Проведенные исследования показали, что при движении поезда на спуск через перелом продольного профиля пути в режиме электрического торможения локомотивом возникающие продольные силы в составе зависят от расположения порожних вагонов в составе, момента начала действия тормозной силы и скорости ее нарастания. Определено, что изменение тормозной силы с той же скоростью, с которой меняются силы воздействия на поезд со стороны профиля пути, приводит к уменьшению упругих колебаний и вероятности возникновения чередующихся сил сжатия и растяжения в межвагонных соединениях, снижению максимальных сил до величины приложенной силы торможения.

Полученные результаты следует учитывать при ведении поездов через переломы продольного профиля пути при регулировании скорости с помощью электродинамического тормоза локомотива.

Список литературы

- 1 Татуревич, А. А. Теоретические исследования устойчивости подвижного состава против схода от вкатывания гребня колеса на рельс / А. А. Татуревич // Вісник Дніпропетр. нац. ун-та заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2003. – № 2. – С. 133–137.
- 2 Ковтун, Е. Н. Динамические характеристики грузовых вагонов при торможении поезда на криволинейных участках

пути / Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова, В. В. Малый // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3. – С. 69–74.

- 3 Serajian, R. Influence of train length on in-train longitudinal forces during brake application / R. Serajian, S. Mohammadi, A. Nasr // Vehicle System Dynamics. – 2019. – Vol. 57, No. 2. – P. 192–206.

- 4 Блохин, Е. П. Исследование продольной нагруженности длинносоставных грузовых поездов при торможении / Е. П. Блохин, Л. В. Урсудяк, Я. Н. Романюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-та заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 38. – С. 7–16.

- 5 Кангожин, Б. Р. Исследование продольных усилий при торможении грузовых длинносоставных поездов на участке пути прямолинейного профиля / Б. Р. Кангожин, М. Ж. Туркбаев, А. М. Смагулова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2009. – № 1. – С. 20–24.

- 6 Бубнов, В. Ю. Уменьшение продольных усилий в автоцепках вагонов при движении тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Бубнов ; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2006. – 24 с.

- 7 Исследование продольной нагруженности грузовых вагонов, оснащенных фрикционными поглощающими аппаратами нового исполнения, при переходных режимах движения поезда / А. С. Васильев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 12–17.

- 8 Болдырев, А. П. Эффективность применения высокоэнергоемких поглощающих аппаратов на грузовых вагонах / А. П. Болдырев, А. М. Гуров // Транспорт Российской Федерации. – Санкт-Петербург, 2014. – № 3. – С. 43–45.

- 9 Шимановский, А. О. Моделирование продольной динамики поезда в среде программного комплекса MSC.ADAMS / А. О. Шимановский, П. А. Сахаров, А. В. Коваленко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – № 7. – С. 75–78.

- 10 Адильханов, Е. Г. Динамика грузовых вагонов при торможении / Е. Г. Адильханов, Ш. А. Секерова // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 3. – С. 62–69.

- 11 Романюк, Я. Н. Оценка продольной нагруженности наливных грузовых неоднородных поездов при различных режимах торможения / Я. Н. Романюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-та заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 3. – С. 219–224.

- 12 Qing, W. Longitudinal dynamics and energy analysis for heavy haul trains / W. Qing, L. Shihui, C. Colin // Journal of Modern Transportation. – 2014. – Vol. 22, No. 3. – P. 127–136.

- 13 International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: results / W. Qing [and other] // Vehicle System Dynamics. – 2018. – Vol. 56, No. 3. – P. 343–365.

- 14 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : [утв. советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества от 6–7 мая 2014 г., № 60]. – 180 с.

- 15 Сахаров, П. А. Исследование продольных сил в грузовых поездах при движении по переломам продольного профиля пути / П. А. Сахаров // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11. – С. 209–219.

Получено 18.04.2019

P. A. Sakharov. Investigation of the longitudinal forces in freight trains in the movement through the gradient changes of the profile path in the electric braking mode.

Longitudinal forces in inter-car connections of the train moving through the gradient changes of the profile path in the mode of electric braking are investigated. The influence of the location of empty cars in the composition and the gradient changes of the profile path on the value of the maximum forces in the couplings of cars is estimated. The dependences of changes in the forces in the inter-car connections at different variants of the braking force are presented.