

Экспериментальная оценка влияния увеличенного времени наполнения тормозных цилиндров шестиосных вагонов сочлененного типа при торможении на продольные силы в поезде

К.В. Башкиров,
директор дирекции проектирования сцепных устройств и тормозных систем ООО «ВНИЦТТ»
А.Л. Ковязин,
руководитель отдела проектирования тормозных систем ООО «ВНИЦТТ»

К.Н. Болотов,
ведущий инженер-конструктор отдела проектирования тормозных систем ООО «ВНИЦТТ»
Д.В. Горский,
технический эксперт НЦ «НПСАП» АО «ВНИИЖТ»

Одним из способов повышения эффективности железнодорожных перевозок является использование конструкции инновационных вагонов второго поколения – сочлененного типа. Применение такого подвижного состава позволяет увеличить погонную нагрузку и грузоподъемность, что в свою очередь ведет к повышению провозной способности [1]. В статье описывается постановка задачи по имитации грузового поезда с различной вариацией схем формирования поезда, приводятся методы обработки экспериментальных данных, а также порядок и правила расчета продольных сил, возникающих при торможении, и тормозного пути с использованием экспериментальных данных. Продемонстрированы результаты расчета продольных сил и тормозного пути для различных схем формирования грузового поезда.

Конструкция тормозной системы

В продуктовой линейке НПК «Объединенная Вагонная Компания» представлены серийно выпускаемые шестиосные вагоны-цистерны сочлененного типа. Две рамы вагона опираются на три двухосные тележки модели 18-9855, причем опора на среднюю тележку выполнена через шарнирный узел сочленения и две пары боковых скользунов постоянного контакта [2]. На рисунке 1 изображен вагон-цистерна для перевозки СУГ модели 15-9541-01 как пример реализации данной конструкции.

Конструкция тормозной системы шестиосного вагона сочлененного типа основана на применении уже известных и апробированных решений по компоновке тормозной рычажной передачи и использованию типового тормозного оборудования. В то же время, за счет наличия двух секций, опирающихся на три ходовые части, шестиосный вагон имеет ряд особенностей по сравнению с типовым четырехосным:

- трубопроводы секций вагона соединены гибкими рукавами, имеющими защиту от внешних механических воздействий;
 - тормозная система имеет три исполнительные части, воздействующие на каждую тележку;
 - тормозная система оборудована запасным резервуаром увеличенного объема.
- Схема реализации конструкции тормозной системы и ее основные компоненты приведены на рисунке 2.

Из схемы видно, что тормозная система оборудована одним воздухораспределителем при наличии трех тормозных ци-



Рис. 1. Вагон-цистерна сочлененного типа модели 15-9541-01

Фото: пресс-служба СВК

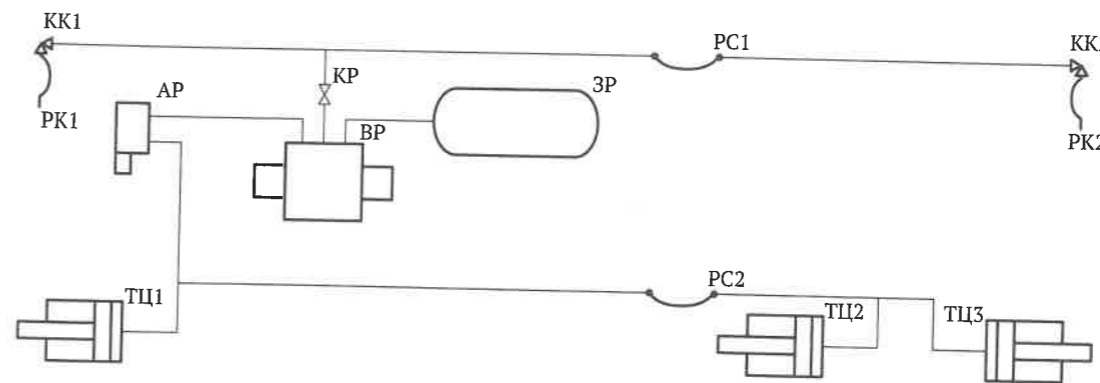


Рис. 2. Схема тормозной системы шестиосного вагона сочлененного типа, где: АР – авторежим; ВР – воздухораспределитель; ЗР – запасной резервуар; КК1, КК2 – кран концевой; КР – кран разобщительный; ПК1, ПК2 – рукав концевой; РС1, РС2 – рукав соединительный; ТЦ1, ТЦ2, ТЦ3 – цилиндр тормозной

линдров, которые образуют суммарный объем в рабочих полостях и подводящих к ним трубопроводах, превышающий аналогичный суммарный объем для тормозной системы типового четырехосного вагона за счет наличия дополнительного тормозного цилиндра и подводящего к нему воздухопровода. В этой связи время наполнения тормозных цилиндров до 95% от максимального значения при выполнении экстренного торможения одиночного вагона составляет до 25 с [3], в то время как показатель роста силы нажатия тормозных колодок на типовом грузовом вагоне составляет не более 15 с [4].

Время роста силы нажатия тормозных колодок при торможении в соответствии со стандартом [5] можно принять прямо пропорциональным времени наполнения тормозных цилиндров. Увеличенное время наполнения тормозных цилиндров вагонов в составе поезда в свою очередь влияет на рост времени подготовки тормозов поезда к действию и увеличение продольно-динамических сил при торможении.

Уменьшение времени наполнения тормозных цилиндров может быть реализовано различными конструктивными решениями, такими как применение реле давления или применение двух воздухораспределителей на вагоне, однако наличие одного воздухораспределителя на шестиосном вагоне сочлененного типа позволяет сократить себестоимость изготовления тормозной системы, ее обслуживания и ремонта, что позитивно сказывается на стоимости жизненного цикла вагона в целом.

В рамках постановки на производство вагона, помимо типовых видов испытаний, установленных стандартами [4, 5], потребовалось проведение дополнительных исследований и испытаний с целью подтверждения работоспособности тормозной системы с вышеуказанными особенностями, а также для подтверждения возможности и безопасности эксплуатации шестиосного вагона сочлененного типа. Для оценки влияния увеличенного времени наполнения тормозных цилиндров на продольно-динамические силы, возникающие в поезде при торможении, и времени подготовки тормозов поезда к действию было проведено моделирование режимов торможения грузовых поездов с включением в состав шестиосных вагонов сочлененного типа при движении на затяжном спуске. При этом были применены методы расчетов и физического моделирования на групповом тормозном стенде АО «ВНИИЖТ» на экспериментальном кольце в Щербинке, имитирующем тормозную систему грузового поезда (рис. 3).



Рис. 3. Групповой тормозной стенд АО «ВНИИЖТ»

Фото: пресс-служба СВК

Условия испытаний

Учитывая возможность эксплуатации шестиосных вагонов в поездах, сформированных из четырехосных вагонов, при испытаниях оценивалось несколько возможных схем формирования поезда из четырехосных и шестиосных вагонов сочлененного типа в соответствии с рисунком 4.

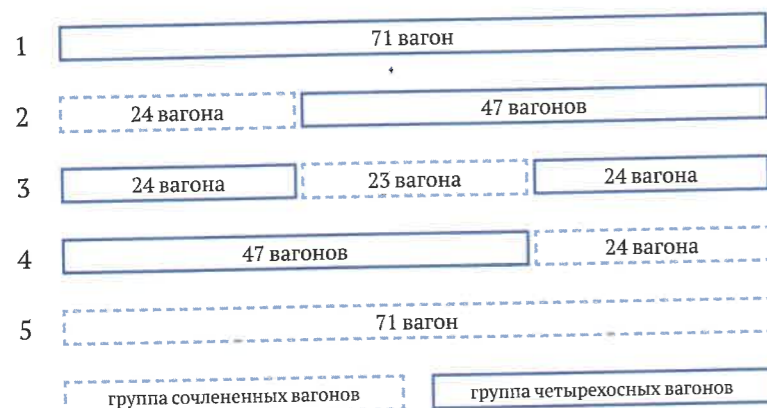


Рис. 4. Схемы формирования поезда

Групповой тормозной стенд состоит из 200 блоков, включающих в себя пневматическую часть тормозной системы грузового вагона с возможностью регулировки выхода штока тормозного цилиндра и имитации загрузки путем поджатия упора вилки авторежима. Весь цикл испытаний проводили при имитации груженого и порожнего состояний вагонов поезда при режиме включения воздухораспределителя «Средний». Увеличенное время наполнения тормозных цилиндров имитировалось путем увеличения выхода штока тормозных цилиндров. Перед началом проведения испытаний на пяти ячейках группового тормозного стенда определено значение выхода штока тормозного цилиндра соответствующего времени его наполнения 15 с и 25 с до 95% от максимального значения при экстренном торможении отдельного груженого вагона. Выход штока для времени наполнения 15 с (время для четырехосного вагона) составил от 110 до 120 мм. Выход штока для времени наполнения 25 с (время для шестиосного вагона сочлененного типа) составил от 170 до 180 мм. Выход штока порожнего вагона был принят на 20% меньшим, чем полученный выход штока для груженого вагона (что соответствует уменьшению выхода штока на вагоне от меньших упругих деформаций тор-

мозной рычажной передачи) и составил 100 и 140 мм для четырехосного и вагонов сочлененного типа соответственно.

Оценку показателей тормозной системы проводили при следующих видах торможения поезда:

- служебные торможения (ступени торможения с разрядкой уравнительного резервуара (УР) крана машиниста (КМ) на 0,05–0,06 МПа (СТ1), 0,07–0,08 МПа (СТ2), 0,11–0,13 МПа (СТ3);
- полное служебное торможение (ПСТ, разрядка УР на 0,15–0,17 МПа);
- экстренное торможение (ЭТ, снижение давления в тормозной магистрали в VI положении ручки КМ до снижения давления в уравнительном резервуаре крана машиниста до 0).

В процессе выполнения опытных торможений на групповом стенде фиксировалось следующее:

- давление сжатого воздуха в тормозной магистрали каждого пятого вагона;
- давление в тормозных цилиндрах каждого вагона;
- время распространения тормозной волны;
- конечное давление в тормозных цилиндрах по длине состава;
- время наполнения тормозных цилиндров по длине состава;
- время распространения отпускной волны;
- время полного отпуска тормозов вагонов по поезду.

На основании данных, полученных на групповом тормозном стенде, с целью оценки продольной динамики и тормозной эффективности производилось математическое моделирование сил реакций в поезде, имеющем в своем составе сплотку из сочлененных вагонов в соответствии со схемой на рисунке 4 и движущемся по нулевому профилю. Критерием, определяющим условия возникновения продольных сил, является характер изменения давления в тормозных цилиндрах каждого вагона в составе поезда, максимальное значение которого на «Среднем» режиме работы воздухораспределителя не должно превышать 0,34 МПа для груженого и 0,16 МПа для порожних вагонов [6].

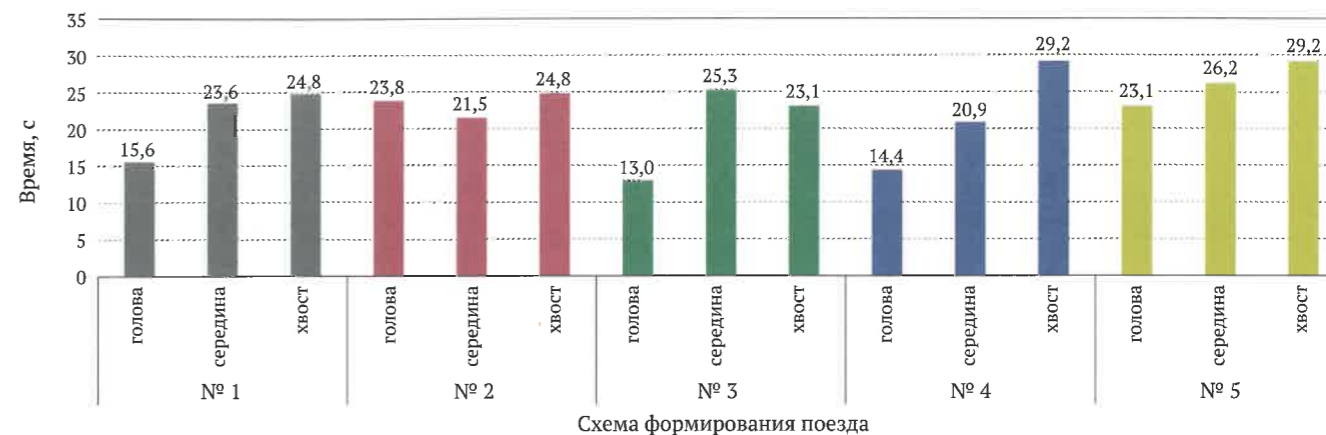


Рис. 5. Время наполнения тормозного цилиндра при экстренном торможении

Результаты испытаний

В результате испытаний было определено время наполнения и отпуска тормозных цилиндров поезда для каждой исследуемой схемы формирования. Экспериментальное время наполнения тормозного цилиндра (от момента перевода ручки КМ в тормозное положение) до достижения 95% от максимального значения давления в цилиндре головного, среднего и хвостового вагонов груженого поезда при экстренном торможении приведено на рисунке 5. Экспериментальное время полного отпуска тормоза по поезду (после экстренного торможения) до снижения давления в тормозных цилиндрах до 0,04 МПа [4] приведено на рисунке 6.

По полученным результатам видно, что максимальное время наполнения и отпуска тормозного цилиндра зафиксировано у условного поезда, сформированного из шестиосных вагонов сочлененного типа (схема формирования поезда № 5). Максимальная величина превышения от условного поезда, сформированного из четырехосных вагонов (схема формирования поезда № 1) составила 15% для времени наполнения и 8% для времени отпуска. В результате испытаний также были получены характеристики изменения давления в тормозных цилиндрах по длине поезда при выполнении торможения и отпуска при всех исследуемых режимах. Примеры полученных характеристик (при выполнении ЭТ) приведены на рисунках 7 и 8.

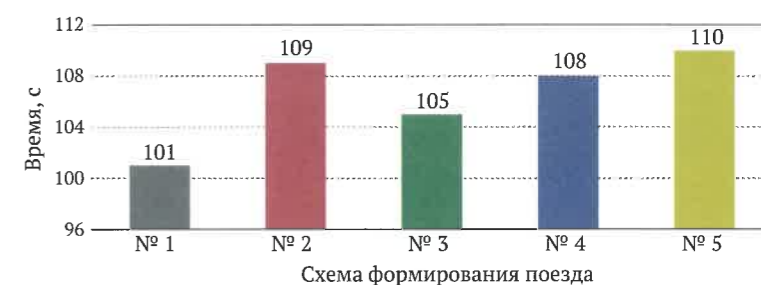


Рис. 6. Время полного отпуска тормоза

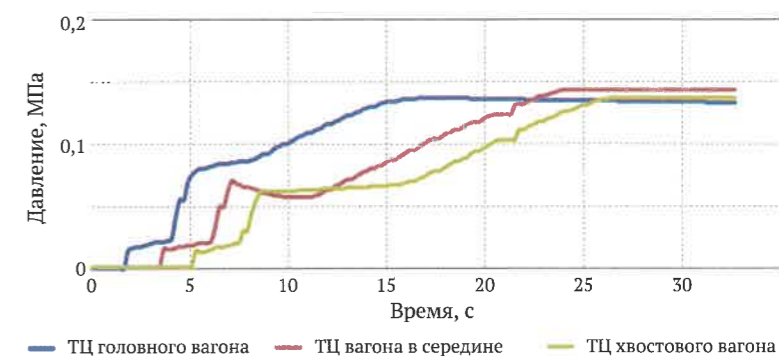


Рис. 7. График изменения давления в тормозных цилиндрах (ТЦ) в поезде в составе из порожних шестиосных вагонов сочлененного типа (схема формирования № 5) при экстренном торможении

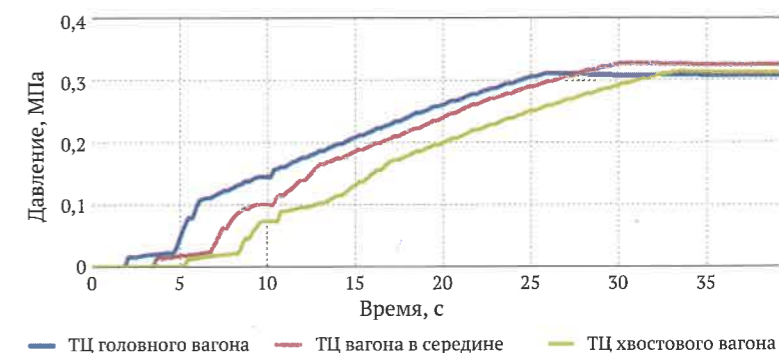


Рис. 8. График изменения давления в тормозных цилиндрах в поезде из груженых шестиосных вагонов сочлененного типа (схема формирования № 5) при экстренном торможении

Порядок расчета

Основным критерием, влияющим на рост продольно-динамических сил по длине поезда, является разность тормозных сил между вагонами (сплотками вагонов), возникающая при торможении или отпуске от момента начала торможения или отпуска до момента выравнивания давлений в тормозных цилиндрах вагонов по длине поезда. На основании полученных данных об изменении давления в тормозных цилиндрах был произведен расчет тормозных сил в процессе торможения для каждого вагона. Расчет тормозных сил проведен в соответствии с [4] и [7].

Технические характеристики и параметры тормозной системы выбраны:

- для вагона сочлененного типа – цистерна модели 15-9549-01;
- для четырехосного вагона – вагон-хоппер 19-9549.

Начальная скорость торможения – 40 км/ч. Движение поезда смоделировано на нулевом профиле.

На основании полученных тормозных сил путем математического моделирования была выполнена оценка возникающих квазистатических продольно-динамических сил (действующих более 2 с). Математическая модель взаимодействия единиц подвижного состава при торможении, использованная для определения продольных сил, состоит из групп твердых тел, количество которых равно трем (первая группа – 1–24 вагон, вторая группа – 25–47 вагон, третья группа – 48–71 вагон). Каждое тело имеет

начальную скорость и может перемещаться вдоль линии, представляющей продольный профиль пути. Тела взаимодействуют между собой через упругие связи, имитирующие сцепные устройства экипажей. К каждому телу в соответствующее время прикладывается продольная сила, численно равная тормозной силе соответствующего экипажа и направленная против движения поезда (рис. 9). Расчет продольно-динамических сил произведен от начала торможения до достижения максимального давления во всех тормозных цилиндрах поезда. Значения тормозных сил рассчитывались для группы однотипных вагонов.

Основное удельное сопротивление определяется в соответствии с зависимостями, приведенными в правилах [7].

Сила взаимодействия между второй и третьей группой вагонов в поезде N_2 определяется по формуле:

$$N_2 = W_{осч3} + W_{доп3} + B_{Т3} + a_{п} m_3, \quad (1)$$

где $W_{осч3}$ – основное удельное сопротивление третьей группы вагонов;

$W_{доп3}$ – дополнительное удельное сопротивление третьей группы вагонов;

$B_{Т3}$ – тормозная сила третьей группы вагонов;

$a_{п}$ – замедление поезда;

m_3 – масса третьей группы вагонов.

Сила взаимодействия между первой и второй группой вагонов в поезде N_1 определяется по формуле:

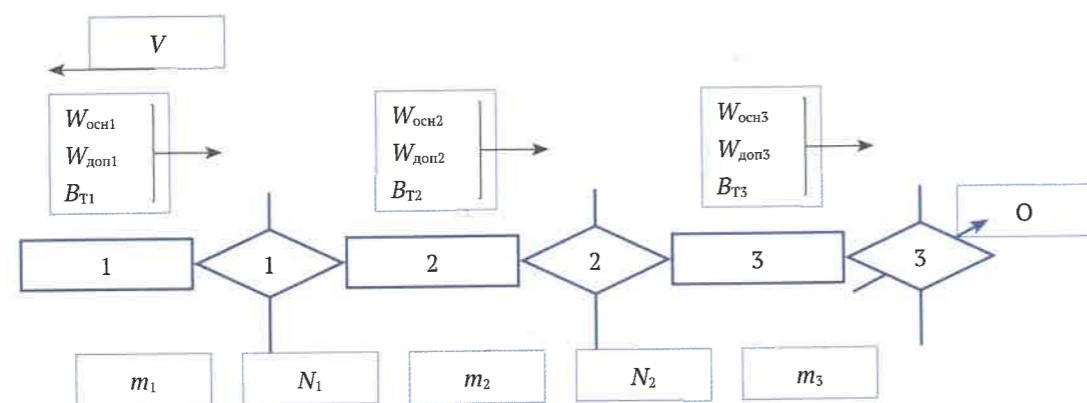


Рис. 9. Расчетная схема для сравнительной оценки продольных сил, где: $W_{осч}$ – основное удельное сопротивление группы вагонов; $W_{доп}$ – дополнительное удельное сопротивление; $B_{Т}$ – тормозная сила группы вагонов; m – масса группы вагонов; N_1, N_2 – сила взаимодействия между первой и второй группой вагонов и второй и третьей группой вагонов соответственно; V – скорость движения

$$N_1 = N_2 + W_{осч2} + W_{доп2} + B_{Т2} + a_{п} m_2, \quad (2)$$

где $W_{осч2}$ – основное удельное сопротивление второй группы вагонов;

$W_{доп2}$ – дополнительное удельное сопротивление второй группы вагонов;

$B_{Т2}$ – тормозная сила второй группы вагонов;

m_2 – масса второй группы вагонов.

Замедление поезда определяется по формуле:

$$a_{п} = (-\sum B_{Т} - \sum W_{осч} - \sum W_{доп}) / M_{п}, \quad (3)$$

где $\sum W_{осч}$ – суммарное основное удельное сопротивление поезда;

$\sum W_{доп}$ – суммарное дополнительное удельное сопротивление поезда;

$\sum B_{Т}$ – суммарная тормозная сила поезда;

$M_{п}$ – масса поезда.

Это упрощенная модель оценки возникновения продольных сил в составе поезда, так как она оценивает взаимодействие только между сплотками вагонов, не учитывая зазоры в ударно-тяговых приборах и работу поглощающего аппарата, однако при этом позволяет провести качественную оценку влияния увеличенного времени наполнения тормозных цилиндров шестиосных вагонов сочлененного типа в составе поезда по сравнению со штатной системой.

Дополнительно по полученным характеристикам изменения давления в тормозных цилиндрах в соответствии с [4] и [7] проводился расчет длины тормозного пути поезда в составе из шестиосных вагонов сочлененного типа.

Результаты расчета

Результаты расчета показывают, что максимальные значения величин продольных сил для всех исследуемых схем формирования поезда возникают при экстренном торможении поезда.

Графики, иллюстрирующие продольные силы в порожнем и груженом поезде при экстренном торможении, приведены на рисунках 10 и 11 соответственно.

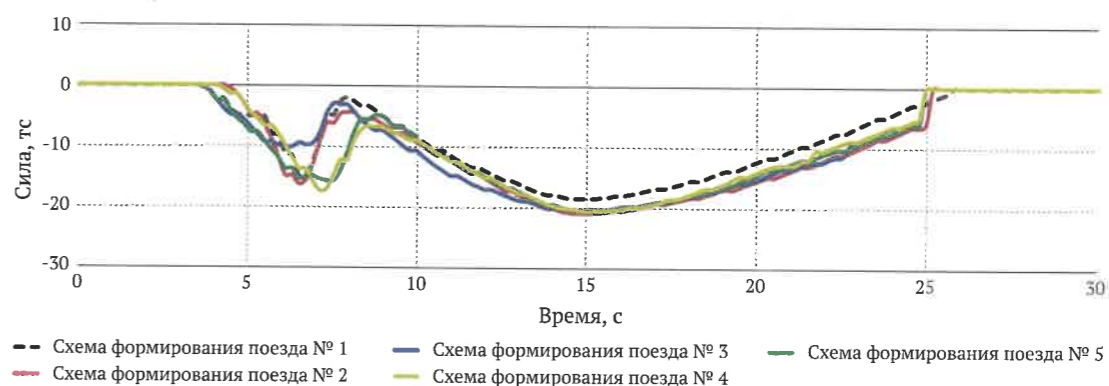


Рис. 10. График продольных сил в порожнем поезде при выполнении экстренного торможения

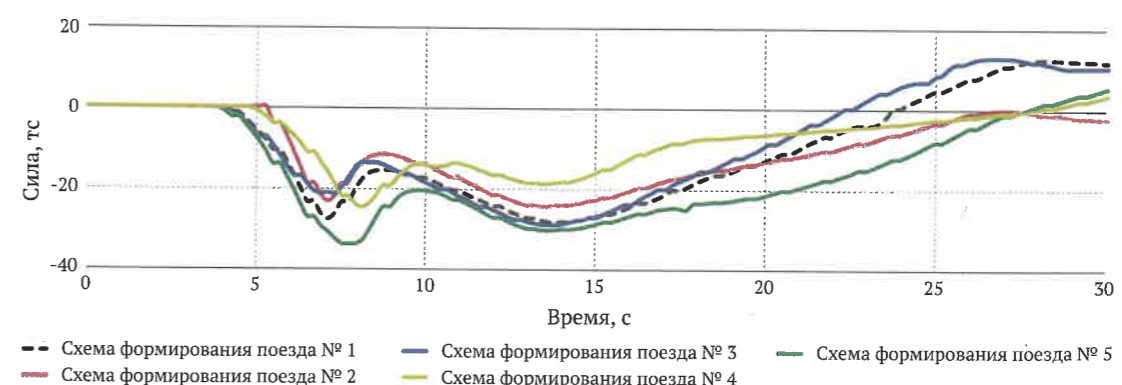


Рис. 11. График продольных сил в груженом поезде при выполнении экстренного торможения

Табл. 1. Максимальная величина продольной силы, тс (кН)

Режим загрузки вагонов поезда	Схема формирования поезда (рис. 2)				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Порожний	18 (177)	21 (206)	20 (196)	20,5 (201)	20,5 (201)
Груженный	29 (285)	24 (236)	29 (285)	35 (344)	25 (245)

Табл. 2. Длина тормозного пути вагона в составе из шестиосных вагонов сочлененного типа

Режим загрузки вагонов поезда	Длина тормозного пути, м		Нормативное значение тормозного пути, м, не более	
	На площадке	На уклоне 10‰	На площадке [4]	На уклоне 10‰ [9]
Порожний	852	997	890	1 200
Груженный	1 053	1 280	1 060	1 500

Максимальные значения продольных сжимающих сил квазистатического характера (действующие более 2 с), полученные при моделировании торможения различных схем формирования поезда при экстренном торможении, приведены в таблице 1.

По результатам расчетов видно, что при выполнении экстренного торможения максимальная величина продольных сил достигается:

- в порожнем поезде, сформированном из обычных грузовых вагонов с группой вагонов сочлененного типа в голове состава (схема формирования № 2), на пятнадцатой секунде – 21 тс, что не превышает норматива для порожнего вагона 40 тс (392 кН), приведенного в стандарте [8].
- в груженом поезде, сформированном из обычных грузовых вагонов с груп-

Заключение

1. На групповом тормозном стенде проведено моделирование пневматических процессов в тормозной системе грузового поезда с включением в него сплотки шестиосных вагонов сочлененного типа, имеющих время наполнения тормозных цилиндров до 25 с. Получен массив данных по изменению давления в тормозных цилиндрах поезда при выполнении всех видов торможений и отпуска при включении в состав поезда сплотов шестиосных вагонов сочлененного типа как в порожнем, так и в груженом состоянии.

пой вагонов сочлененного типа в хвосте состава (схема формирования № 4), на восьмой секунде – 35 тс, что не превышает норматива для груженого вагона 120 тс (1 177 кН), приведенного в стандарте [8].

Длины тормозных путей поезда в составе из шестиосных вагонов сочлененного типа при начальной скорости торможения 90 км/ч (для груженных вагонов) и 100 км/ч (для порожних) при экстренном торможении, рассчитанные с учетом характеристик наполнения тормозных цилиндров, полученных на групповом тормозном стенде, приведены в таблице 2. По результатам расчета длины тормозного пути вагона в составе из шестиосных вагонов сочлененного типа не превышают нормативных значений, установленных в [4] и [9].

2. Произведена оценка возникающих при торможении поезда, в состав которого включены сплотки с шестиосными вагонами сочлененного типа, продольно-динамических сил квазистатического характера. Максимальные значения продольных сжимающих сил квазистатического характера возникают при выполнении экстренного торможения и расположении сплотки вагонов сочлененного типа в хвосте поезда и оценочно составляют:

- для порожнего поезда – не более 206 кН;

– для груженого поезда – не более 344 кН. Полученные значения не превышают нормативов продольно-динамических сил, приведенных в стандарте [8].

3. На основании результатов моделирования тормозной системы на групповом тормозном стенде, расчетной оценки квазистатических продольных сил при торможении и тормозной эффективности шестиосные вагоны сочлененного типа могут курсировать в составах смешанных грузовых поездов.

4. Для фактической оценки возникающих продольно-динамических сил, а также тормозной эффективности были проведены натурные ходовые испытания грузового поезда с включением в него сплотки шестиосных вагонов сочлененного типа на действующих линиях железных дорог. По результатам проведенных поездных испытаний установлено:

- значения продольных сжимающих и растягивающих сил не превышают допустимых значений [8];
- тормозная система грузового поезда длиной 71 условный вагон обеспечивает необходимую тормозную эффективность и управляемость при выполнении всех видов торможений в соответствии с дей-

Список использованной литературы

1. Шевченко Д.В., Федоров С.А., Меркулов А.А., Мышенкова А.А., Мягков Б.А. Вагон-хоппер сочлененного типа // Вагоны и вагонное хозяйство, 2019. – № 4 (60). С. 27–30.
2. Федоров С.А., Агинских М.В., Лобанов М.С., Шилова Е.В. Вагон-цистерна сочлененного типа для перевозки сжиженных углекислотных газов // Вагоны и вагонное хозяйство, 2019. № 2 (58). С. 30–32.
3. СТО-ОВК-1-2018. Вагоны-цистерны сочлененного типа. Общие технические условия.
4. ГОСТ 34434-2018. Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета.
5. ГОСТ 33597-2015. Тормозные системы железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний.
6. Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов № 732-ЦВ-ЦЛ, утверждено 54 заседанием Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (18–19 мая 2011 г.).
7. Правила тяговых расчетов для поездной работы, утв. Распоряжением от 12 мая 2016 г. № 867р.
8. СТО РЖД 1.07.002-2010. Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых вагонов повышенной веса и длины. Технические требования.
9. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава, утв. 60 заседанием Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (6–7.05.2014 г.).
10. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Ⓢ

“ В результате подтверждена безопасная эксплуатация груженых и порожних шестиосных вагонов сочлененного типа в смешанных грузовых поездах, сформированных из четырехосных и шестиосных вагонов сочлененного типа.

ствующими нормативами [4, 9] с учетом расположения сплотки из шестиосных вагонов сочлененного типа в любой части поезда;

- динамические показатели шестиосного вагона сочлененного типа в составе поезда соответствуют нормативным требованиям [10].

5. В результате проведенных работ подтверждена безопасная эксплуатация груженых и порожних шестиосных вагонов сочлененного типа (с временем наполнения тормозных цилиндров до 25 с [3]) в смешанных грузовых поездах, сформированных из четырехосных и шестиосных вагонов сочлененного типа длиной 71 условный вагон с установленными скоростями движения грузовых поездов на сети железных дорог.