

УДК 629.4.017

К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов

Д. Н. Курилкин¹, А. В. Исаев², В. Ф. Танаев³, В. Г. Погудин⁴, А. А. Романова¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29

³ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 107174, Москва, ул. Новая Басманная, 2/1, стр. 1

⁴Служба вагонного хозяйства Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 191036, Санкт-Петербург, Невский пр., 85, литера Ф

Для цитирования: Курилкин Д. Н., Исаев А. В., Танаев В. Ф., Погудин В. Г., Романова А. А. К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 594–604. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-594-604

Аннотация

Цель: Интенсификация грузовых перевозок требует все более точного прогнозирования траектории движения поездов. Однако до сих пор не существует единого подхода к определению тормозных сил в грузовом поезде при отпуске тормозов, что существенно снижает точность расчетов в этом режиме движения. Кроме того, действующие нормативы ограничивают возможность длительного использования режима тяги после торможения и отпуска. **Методы:** В работе выполнен статистический анализ данных записей автономных устройств регистрации пневматических и динамических процессов в грузовом поезде разработки АО «ВНИИЖТ» и модельный эксперимент по определению параметров отпускных процессов. **Результаты:** Разработана методика, позволяющая рассчитывать характер изменения тормозных сил в процессе отпуска для грузовых поездов различной длины, после различных ступеней служебного торможения. Математически доказана статистическая значимость полученных результатов. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют значительно улучшить точность прогнозирования траектории движения поезда и расширить возможности управления в тяговых режимах. Это способствует созданию более совершенных систем автоведения, а также увеличению скоростей движения и сокращению межпоездных интервалов.

Ключевые слова: Тормозные процессы, тормозные расчеты, отпуск грузовых поездов, время отпуска тормозов, тормозные силы.

Одним из вопросов, решение которого вызывает существенные затруднения при выполнении тяговых расчетов с грузовыми поездами, является порядок определения тормозной силы при использовании пневматического торможения.

Тормозные силы B_T , действующие на поезд при пневматическом торможении, могут быть определены из выражения [1–3]:

$$B_T = \sum K_p^k \cdot \varphi_{kp}^k + \sum K_p^u \cdot \varphi_{kp}^u ; \quad (1)$$

где $\sum K_p^k$ и $\sum K_p^ч$ — соответственно суммарное расчетное нажатие всех композиционных и чугунных колодок в поезде на колесные пары (Н); $\varphi_{кр}^k$, $\varphi_{кр}^ч$ — расчетные коэффициенты трения композиционных и чугунных тормозных колодок.

Расчетные коэффициенты трения и силы нажатия тормозных колодок определяются по известным зависимостям [1–3], учитывающим конструктивные параметры тормозных рычажных передач, и зависят от величин давлений в тормозных цилиндрах подвижного состава.

Наиболее сложен при определении тормозных сил учет инерционности работы пневматической тормозной системы поезда, выражающейся в длительном и неодновременном процессе наполнения тормозных цилиндров локомотивов и вагонов, а также в длительном процессе отпуска тормозов подвижного состава, во время которого использование тяговых режимов управления поездом не допускается, а тормозная сила постепенно уменьшается до нуля.

Теоретическому и практическому определению характера изменения тормозных сил в процессе наполнения тормозных цилиндров посвящено большое число исследований [1–7]. В целом при определении характера наполнения тормозных цилиндров может быть использована стандартная методика «Правил тяговых расчетов», приведенная в [1].

Особым вопросом, требующим уточнения, является характер изменения тормозной силы в процессе отпуска тормозов. В нормативно-справочной литературе [1–4] указано, что время полного отпуска и зарядки тормозов должно быть принято 90–120 с при регулировочном служебном торможении грузовых поездов и 30–60 с при регулировочном торможении пассажирских поездов. Результаты ряда исследований показывают [6–11], что скорость распространения отпускной волны в грузовом поезде зависит от целого

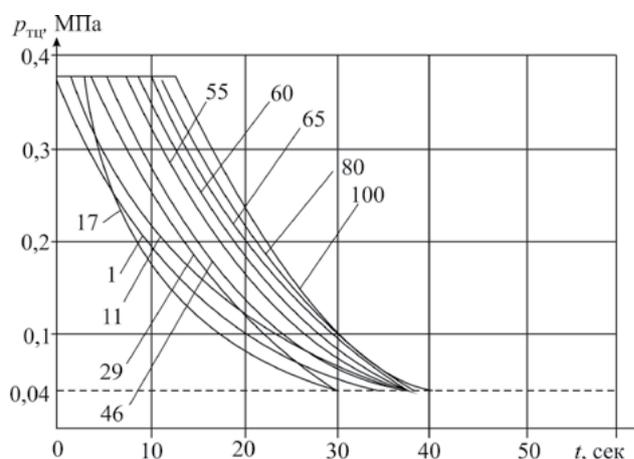
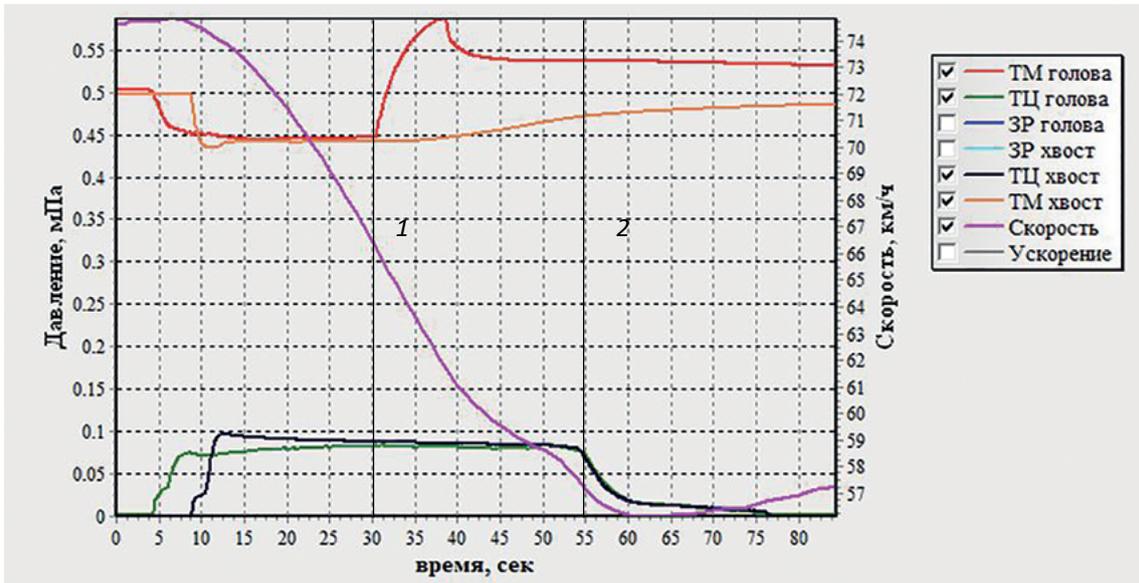


Рис. 1. Диаграмма отпуска тормозов в грузовом поезде из 100 вагонов после полного служебного торможения

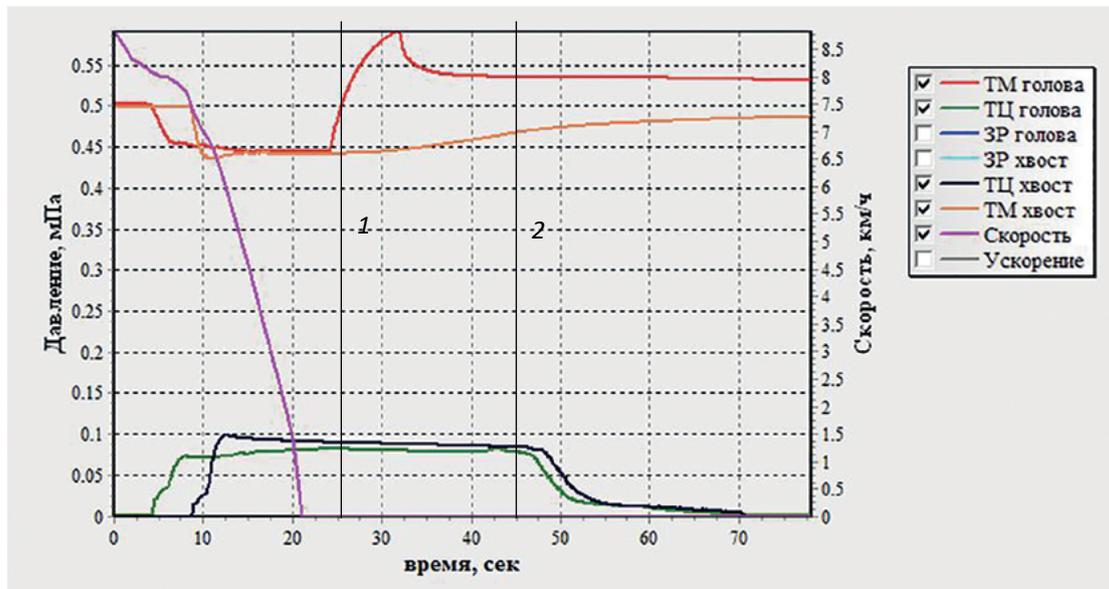
ряда факторов и по разным оценкам составляет 50–70 м/с. Как следует из приведенных в [10] диаграмм наполнения и опорожнения тормозных цилиндров (рис. 1), время непосредственно отпуска тормозов одного вагона после полного служебного торможения не превышает 40–50 с.

Между тем эти результаты были получены для случаев применения полного служебного и экстренного торможения. Кроме того, данные, приведенные в работах [1–3, 10] получены более 20 лет назад. С тех пор устройство тормозных систем грузовых вагонов претерпело существенные изменения [12].

Для получения актуальной информации о переходных процессах в тормозной системе грузового поезда в процессе отпуска после регулировочных торможений были проанализированы записи автономных устройств регистрации пневматических и динамических процессов в грузовом поезде (АУР) разработки АО «ВНИИЖТ». Были проанализированы результаты 14 опытных поездок с поездами, состоящими из четырехосных грузовых вагонов. При этом составы поездов были сформированы из четырехосных цистерн или полувагонов длиной 12,2–14,3 м. Число вагонов в составах колебалось от 65 до 70. Анализировались режимы служебного регулировоч-



а



б

Рис. 2. Записи процесса регулировочного торможения системой автономных устройств регистрации пневматических и динамических процессов в грузовом поезде маршрута Алтайская — Карасук

ного торможения одной ступенью со снижением давления в тормозной магистрали $0,6\text{--}0,7 \text{ кг/см}^2$ ($0,06\text{--}0,07 \text{ МПа}$). Опытные поездки осуществлялись на Западно-Сибирской и Октябрьской железных дорогах — филиалах ОАО «РЖД» в 2022–2024 гг. В общей сложности было проанализировано 165 измерений регулировочного служебного торможения грузовых поездов.

Пример записи процесса торможения и отпуска поезда системой АУР от 22.08.2023 по маршруту Алтайская — Карасук приведен на рис. 2. Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, интервал времени между моментом постановки ручки крана машиниста в отпускное положение (линия 1) и моментом начала отпуска тормозов в поезде (линия 2) составляет порядка 20–25 с.

Однако стоит отметить, что в данном случае не совсем корректно считать данный интервал временем распространения отпускной волны, так как отпуск тормозов в головном и хвостовом вагонах поезда происходит или практически синхронно (рис. 2, а), или с разницей во времени не более 3 с (рис. 2, б). При этом на протяжении длительного времени с момента начала отпуска давление в тормозных цилиндрах неизменно, а спустя 20–25 с происходит его уменьшение во всех вагонах поезда с небольшой разницей по времени. Аналогичные результаты получены в 9 поездках, причем в некоторых случаях тормоза хвостового вагона отпускали раньше, чем головного.

Отличный от вышеописанного результат был получен в пяти поездках (37% случаев), где между временем отпуска в головных и хвостовых вагонах наблюдается существенная разница (от 10 до 25 секунд) по времени протекания отпускных процессов.

Для характеристики отпускных процессов предлагается использовать следующие параметры (интервалы времени):

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов головного вагона $t_{нг}$;

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до окончания отпуска тормозов головного вагона $t_{кг}$;

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов хвостового вагона $t_{нх}$;

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до окончания отпуска тормозов хвостового вагона $t_{кх}$.

Полученные по результатам обработки 165 записей статистические характеристики приведены в таблице.

В соответствии с методом Е. И. Пустыльника [13] для того, чтобы закон распределения случайных величин при 165 измерениях мог считаться

Характеристика отпускных процессов в грузовом поезде после ступени служебного торможения 0,6–0,7 кгс/см²

Параметр	$t_{нг}$	$t_{кг}$	$t_{нх}$	$t_{кх}$
Математическое ожидание, с	10,1	33,5	18,1	39,3
Среднеквадратичное отклонение, с	3,5	5,6	5,1	6,9
Асимметрия	0,12	0,04	0,47	0,4
Эксцесс	–0,07	0,05	0,07	–0,06

нормальным, асимметрия не должна превышать 0,56, а эксцесс — 0,14. Как видно из табл. 1, все величины соответствуют указанным условиям.

С учетом того, что математическое ожидание $t_{нг}$ составляет более 50 % от математического ожидания $t_{нх}$, а разница между математическими ожиданиями $t_{кг}$ и $t_{кх}$ составляет менее 20 %, то представляется корректным взамен классического понимания скорости распространения отпускной волны $v_{ов}$ (м/с), равной:

$$v_{ов} = \frac{L_{ТМ}}{t_{нх}}, \quad (2)$$

где $L_{ТМ}$ — длина тормозной магистрали, м;

использовать термин «скорость передачи отпускной волны» $v_{пов}$ (м/с), которая равна:

$$v_{пов} = \frac{L_{ТМ}}{(t_{нх} - t_{нг})}. \quad (3)$$

В связи с длительным срабатыванием воздухораспределителей на отпуск данный параметр будет в меньшей степени зависеть от длины тормозной магистрали, и с учетом того, что длина тормозной магистрали $L_{ТМ}$ при проведении испытаний колебалась от 780 до 1030 м, получим среднее значение $v_{пов}$ (км/ч), равное 110 м/с.

Чтобы оценить время завершения отпуска тормозов в составах грузовых поездов различной длины, введем понятие скорости завершения отпуска $v_{зоб}$, определяемой по зависимости:

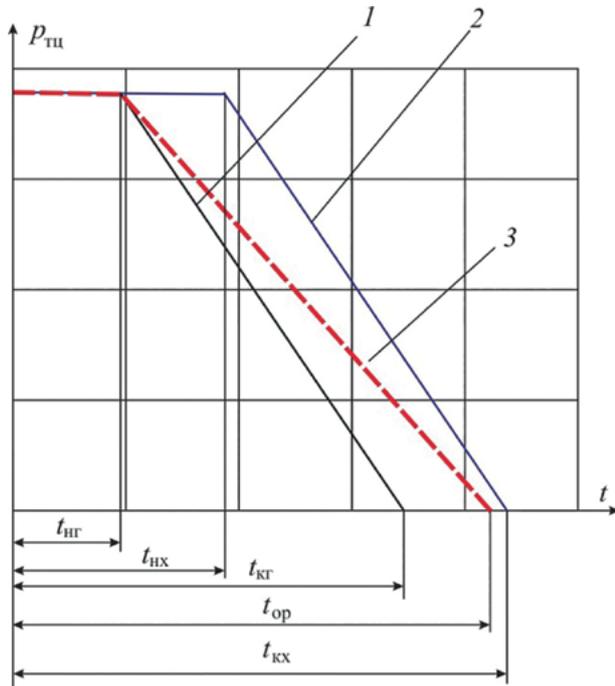


Рис. 3. Расчетная диаграмма отпуска тормозных цилиндров:

$p_{тц}$ — давление в тормозном цилиндре;
 1 — отпуск тормоза первой единицы подвижного состава; 2 — отпуск тормоза последней единицы подвижного состава; 3 — расчетная диаграмма отпуска тормоза поезда

$$v_{зоб} = \frac{L_{тм}}{(t_{кк} - t_{гк})} \text{ м/с.} \quad (4)$$

Значение скорости завершения отпуска $v_{зоб}$ составит порядка 156 м/с.

В связи с ограниченным количеством информации о тормозных средствах поезда, можно считать характер снижения давления линейным и использовать расчетную схему, приведенную на рис. 3.

В соответствии с расчетной схемой усредненное по поезду давление в тормозных цилиндрах подвижного состава $p_{ср}$ в процессе отпуска может быть определено по зависимости:

$$\text{если } t_o \leq t_{нг}, \text{ то } p_{ср} = p_{ср}^T;$$

$$\text{если } t_{нг} \leq t_o \leq t_{оп}, p_{ср} = p_{ср}^T \frac{t_{оп} - t_o}{t_{оп} - t_{нг}}; \quad (5)$$

$$\text{если } t_o \geq t_{оп}, \text{ то } p_{ср} = 0;$$

где $p_{ср}^T$ — среднее давление в тормозных цилиндрах поезда в конце торможения;

t_o — время, прошедшее с момента постановки органа управления тормозами в отпускное положение;

$t_{оп}$ — расчетное время отпуска тормозных цилиндров в среднем по поезду, определяемое по зависимости:

$$t_{оп} = t_{кг} + \frac{1}{2}(t_{нк} - t_{нг}) + \frac{1}{2}(t_{кк} - t_{кг}). \quad (6)$$

Используемые в зависимости (6) интервалы времени: $t_{нг}$ (от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов головного вагона) и $t_{кг}$ (до окончания отпуска тормозов головного вагона) — можно считать независимыми от длины состава грузового поезда и принять равными математическому ожиданию данных величин: 10,1 и 33,5 с соответственно.

Интервалы времени от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов хвостового вагона и от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до окончания отпуска тормозов хвостового вагона зависят от длины состава поезда и после элементарных преобразований зависимостей (3) и (4) могут быть определены исходя из следующих соотношений:

$$t_{нк} = t_{нг} + \frac{L_{тм}}{v_{пов}}; \quad (7)$$

$$t_{кк} = t_{кг} + \frac{L_{тм}}{v_{зоб}}. \quad (8)$$

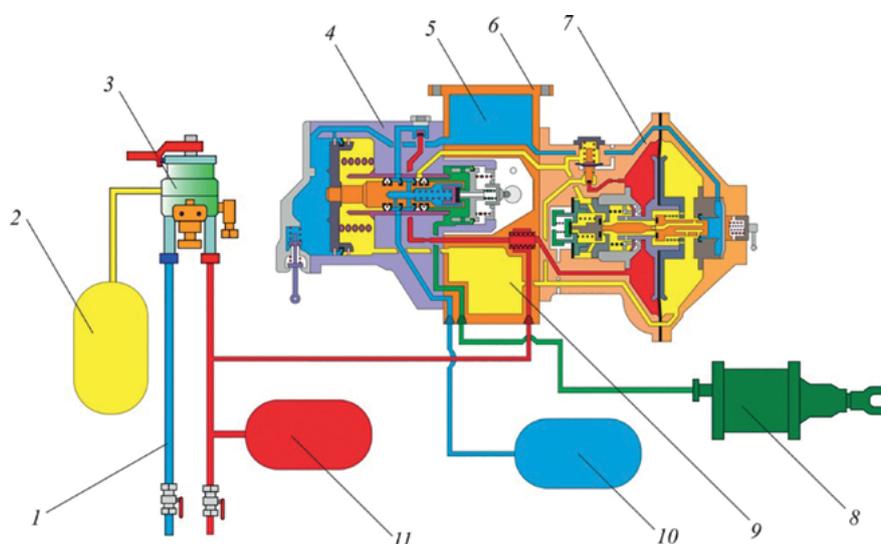


Рис. 4. Пневматическая схема стенда для проверки работы воздухораспределителя грузового типа:

- 1 — питательная магистраль (ПМ); 2 — уравнивающий резервуар (УР); 3 — кран машиниста усл. № 394-002; 4 — главная часть воздухораспределителя усл. № 270-023; 5 — рабочая камера воздухораспределителя (РК); 6 — двухкамерный резервуар воздухораспределителя усл. № 295-001; 7 — магистральная часть воздухораспределителя усл. № 483М-010; 8 — тормозной цилиндр усл. № 188Б; 9 — золотниковая камера воздухораспределителя (ЗК); 10 — запасный резервуар; 11 — объем тормозной магистрали

Представленные в таблице результаты справедливы для ступени торможения 0,6–0,7 кгс/см². Для определения влияния величины ступени торможения в лаборатории «Автоматические тормоза подвижного состава» (ауд. 4-104 ФГБОУ ВО ПГУПС) на стенде для испытания тормозов грузового типа была выполнена серия экспериментов по оценке влияния ступени торможения на время отпуска одиночного воздухораспределителя грузового типа. Принципиальная схема стенда показана на рис. 4, а его общий вид показан на рис. 5 (фото сделано Д. Н. Курилкиным).

В соответствии с требованиями федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» для измерения и фиксации значений величин давлений в элементах стенда параллельно с манометрами в схеме были размещены датчики давления, фиксирующие изменение давления в ПМ, УР, ТМ, ТЦ, ЗР, ЗК и РК воздухораспределителя. Сигнал от датчиков дав-

ления передается на ПК, где при помощи программы, разработанной в среде Delphi, происходит отображение их фиксации с частотой 10 раз в секунду. Результаты экспериментов сохраняются в виде табличных записей в файлы формата MS Excel. Для получения статистически значимой картины эксперимента было выполнено 85 ступеней торможения и отпусков тормоза с величиной ступени $\Delta p_{\text{тм}}$ от 0,4 кгс/см² до 1,4 кгс/см².

При этом для уменьшения влияния характеристик конкретного воздухораспределителя на результаты экспериментов примерно через 20 измерений выполнялась замена главной и магистральной части воздухораспределителя на аналогичные элементы. Всего было использовано четыре главных и четыре магистральных части воздухораспределителей, что эквивалентно испытанию четырех воздухораспределителей усл. № 483М и А. При этом использовались узлы работоспособных тормозных приборов, прошед-

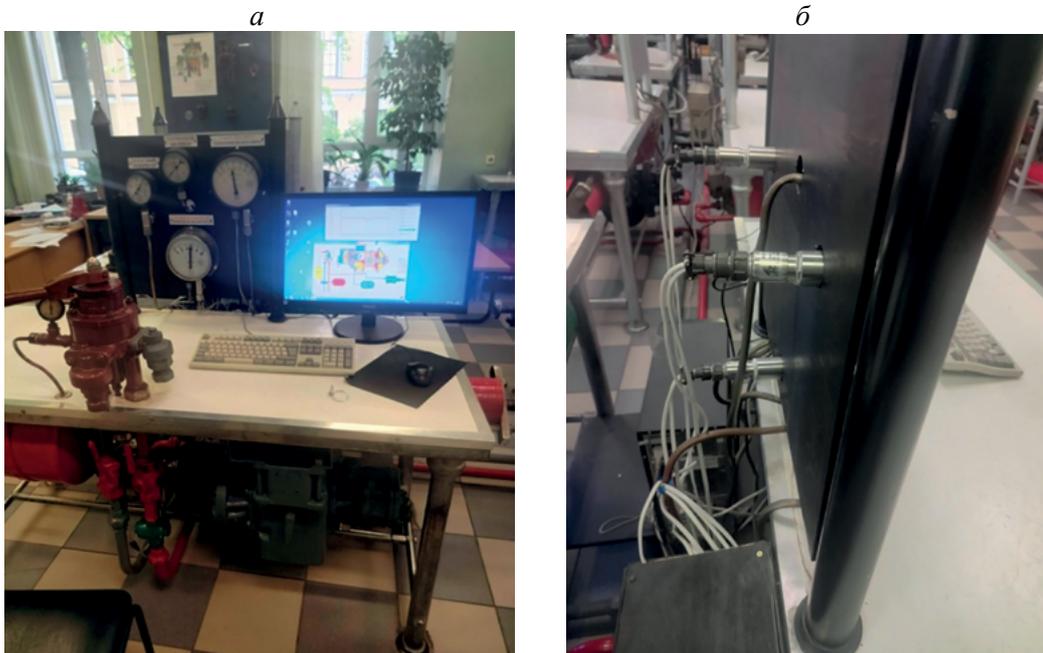


Рис. 5. Стенд для проверки действия воздухораспределителя грузового типа:
а — общий вид; *б* — подключение датчиков давления (фото сделано Д. Н. Курилкиным)

ших проверку на устройстве контроля воздухораспределителей грузовых вагонов.

Такой порядок испытаний, по мнению авторов, соответствует реальным условиям эксплуатации ВР на грузовых вагонах, так как двухкамерный резервуар меняется на вагонах только при капитальном ремонте, а главная и магистральная части проходят проверку на УКВР при плановом ремонте (по пробегу или через 2–3 года).

Так как испытания выполнялись на лабораторном стенде, условия эксплуатации которого существенно отличаются от условий реальной эксплуатации грузовых вагонов (плотность тормозной сети, температура, длина тормозной магистрали и т. п.), то результат оценивался через коэффициент K_p , равный отношению времени отпуска при фактической величине ступени торможения $t_{\text{оф}}$ ко времени отпуска при ступени торможения $0,65 \text{ кгс/см}^2$ $t_{0,65}$:

$$K_p = \frac{t_{\text{оф}}}{t_{0,65}}. \quad (9)$$

Результаты определения коэффициента K_p приведены на рис. 6. Для учета влияния величины ступени торможения на время отпуска все величины, приведенные в таблице, перед подстановкой в зависимости (6)–(9) должны умножаться на K_p .

Коэффициент K_p может быть аппроксимирован линейной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,853^{\wedge}$:

$$K_p = 1,835 \cdot \Delta p_{\text{тм}} - 0,19. \quad (10)$$

При этом стоит учитывать, что зависимости (5)–(10) являются теоретическими и требуют дальнейшей проверки в реальных условиях эксплуатации.

На основании выполненных исследований можно прийти к следующим основным выводам:

1. В работе предложена методика определения времени отпуска тормозов грузового поезда при различной длине состава и величине ступени торможения, построенная на основании экспериментальных данных.

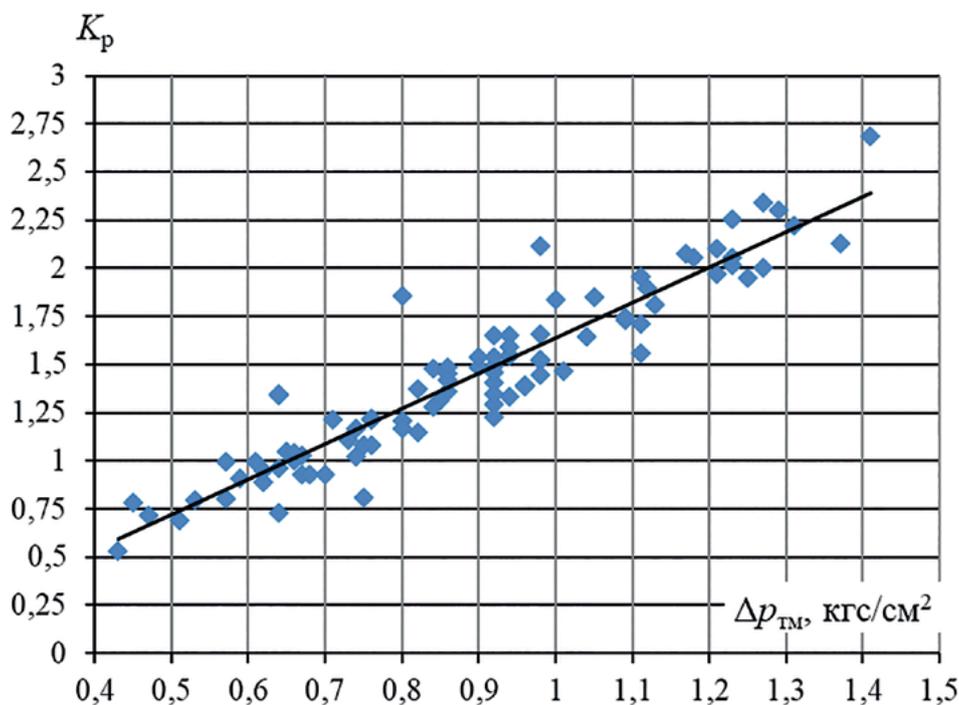


Рис. 6. Определение коэффициента влияния степени торможения на время отпуска тормозных цилиндров грузовых вагонов:
 Δp_{TM} — степень торможения, кгс/см²

2. Вместо скорости распространения тормозной волны целесообразно использовать термины «скорость передачи отпускной волны» и «скорость завершения отпускной волны».

3. В работе с помощью лабораторного эксперимента показано влияние степени служебного торможения на время отпуска тормозов поезда.

Список источников

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р / ОАО «РЖД». — М., 2016. — 514 с.

2. Гребенюк П. Т. Правила тормозных расчетов / П. Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. — М.: Интекст, 2004. — 112 с.

3. Гребенюк П. Т. Нормативы продольных сил и тормозных путей длинносоставных и скоростных поездов / П. Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. — М.: Интекст, 2007. — 240 с.

4. Никифоров Б. Д. Автоматизация управления торможением поездов / Б. Д. Никифоров, В. И. Головин, Ю. Г. Кутыев. — М.: Транспорт, 1985. — 263 с.

5. Худорожко М. В. Переход к вождению соединенных поездов одной локомотивной бригадой. Управление пневматическим торможением при отказах тормозного оборудования / М. В. Худорожко, И. А. Елисеев, С. А. Муров, А. В. Стельмашенко // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Локомотив. Электрический транспорт XXI век». — СПб.: ПГУПС, 2020. — С. 386–411.

6. Иноземцев В. Г. Параметры тормозных систем для поездов повышенной массы и длины / В. Г. Иноземцев, В. Ф. Ясенцев, Е. И. Кузьмина // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Исследование автотормозов железнодорожного подвижного состава. — М.: Транспорт, 1984. — С. 3–8.

7. Горин А. Ф. Определение основных характеристик тормозной системы вагонов, эксплуатируемых на

больших уклонах пути / А. Ф. Горин, А. В. Казаринов // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Исследование автотормозов железнодорожного подвижного состава. — М.: Транспорт, 1984. — С. 27–32.

8. Нехаев В. А. Оптимизация режимов ведения поезда с учетом критериев безопасности движения (методы и алгоритмы): дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / В. А. Нехаев. — Омск: ОмГУПС, 2000. — 353 с.

9. Попов В. Е. Об алгоритме отпуска пневматических тормозов / В. Е. Попов, Г. М. Елсаков, И. Г. Левин // Автоматизация управления тормозами поезда: межвуз. сб. науч. тр. — Свердловск: УрЭМИИТ, 1980. — С. 37–42.

10. Пытляков В. А. Результаты испытания автоматических тормозов грузовых поездов на Забайкальской железной дороге / В. А. Пытляков // Автоматизация управления тормозами поезда: межвуз. сб. науч. тр. — Свердловск: УрЭМИИТ, 1980. — С. 52–55.

11. Кулага А. А. Повышение эффективности работы тормозных систем длиннобазных контейнерных плат-

форм: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / А. А. Кулага. — М., 2019. — 120 с.

12. Соколов А. Б. Воздухораспределители: настоящее и перспективы / А. Б. Соколов // Железнодорожный транспорт. — 2006. — №8. — С. 73–75.

13. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М.: Наука, 1968. — 288 с.

Дата поступления: 30.07.2025

Решение о публикации: 21.08.2025

Контактная информация:

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, доц.; kurilkin@pgups.ru

ИСАЕВ Александр Владимирович — канд. техн. наук; isaev@avtomashinist.ru

ТАНАЕВ Валерий Фаритович — lt@pgups.ru

ПОГУДИН Вениамин Григорьевич — lt@pgups.ru

РОМАНОВА Анна Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; anuromanova@inbox.ru

On the Issue of the Inertia Braking System of a Freight Train When Performing Traction and Braking Calculations

D. N. Kurilkin¹, A. V. Isaev², V. F. Tanaev³, V. G. Pogudin⁴, A. A. Romanova¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politechnicheskaya str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

³JSC “Russian Railways”, 2/1, bld 1, Novaya Basmannaya str., Moscow, 107174, Russian Federation

⁴Railway Wagon Service of the Oktyabrskaya Railway, a branch of JSC Russian Railways, 85, Nevsky pr., Saint Petersburg, 191036, litera F

For citation: Kurilkin D. N., Isaev A. V., Tanaev V. F., Pogudin V. G., Romanova A. A. On the Issue of the Inertia Braking System of a Freight Train When Performing Traction and Braking Calculations // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 594–604. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-594-604

Summary

Purpose: In view of the intensification of freight transportation, there is an increasing imperative for enhanced accuracy in the forecasting of potential movement trajectories. Concurrently, a lack of a unified approach to the determination of the braking forces in a freight train during brake release persists. This results in a substantial

decline in the precision of calculations in this mode of operation. The prevailing regulatory framework does not permit the prolonged utilisation of traction mode after braking and releasing. **Methods:** The paper presents a statistical analysis of the autonomous device records of pneumatic and dynamic processes in a freight train developed by JSC VNIIZHT, as well as a model experiment to determine the release parameters. **Results:** A methodology has been developed to calculate the braking force changes during the release for freight trains of various lengths and after various service braking stages. The statistical significance of the obtained results has been mathematically proven. **Practical significance:** The results obtained will make it possible to significantly improve the accuracy of predicting the train's trajectory and increase the ability to control the train in traction modes. This will contribute to the design of enhanced automatic train operation systems, increase travel speeds and reduce inter-train intervals.

Keywords: Braking processes, braking calculations, release of freight trains, brake release time, braking forces.

References

1. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty: utverzhdeny rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12.05.2016 № 867r* [Rules for traction calculations for train operation: approved by the order of JSC Russian Railways dated 12.05.2016 № 867r]. Moscow: OAO "RZhD", 2016, 514 p. (In Russian)
2. Grebenyuk P. T. Pravila tormoznykh raschetov [Rules for braking calculations]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow: Intekst Publ., 2004, 112 p. (In Russian)
3. Grebenyuk P. T. Normativy prodol'nykh sil i tormoznykh putei dlinnosostavnykh i skorostnykh poezdov [Standards of longitudinal forces and braking distances for long and high-speed trains]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow: Intekst Publ., 2007, 240 p. (In Russian)
4. Nikiforov B. D., Golovin V. I., Kutyev Yu. G. *Avtomatizatsiya upravleniya tormozheniem poezdov* [Train braking control automation]. Moscow: Transport Publ., 1985, 263 p. (In Russian)
5. Khudorozhko M. V., Eliseev I. A., Murov S. A., Stelmashenko A. V. Perekhod k vozhdenniu soedinennykh poezdov odnoi lokomotivnoi brigadoi. Upravlenie pnevmaticheskimi tormozheniem pri otkazakh tormoznogo oborudovaniia [Transition to driving combined trains by one locomotive crew. Pneumatic braking control at brake equipment failures]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Lokomotiv. Elektricheskii transport XXI vek"* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Locomotive. Electric Transport of the XXI Century"]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2020, pp. 386–411. (In Russian)
6. Inozemtsev V. G., Yasentsev V. F., Kuz'mina E. I. Parametry tormoznykh sistem dlya poezdov povyshennoy massy i dliny [Brake system parameters for high-mass and long trains]. *Sb. nauch. tr. VNIIZHT. Issledovanie avtotormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Coll. sci. tr. VNIIZhT. Study of automatic brakes of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984, pp. 3–8. (In Russian)
7. Gorin A. F., Kazarinov A. V. Opredelenie osnovnykh kharakteristik tormoznoy sistemy vagonov, ekspluatiruemykh na bol'shikh uklonakh puti [Determination of basic characteristics of brake system of cars operated on steep gradients]. *Sb. nauch. tr. VNIIZHT. Issledovanie avtotormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Coll. sci. t. VNIIZhT. Study of automatic brakes of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984, pp. 27–32. (In Russian)
8. Nekhaev V. A. *Optimizatsiya rezhimov vedeniya poezda s uchetom kriteriev bezopasnosti dvizheniya (metody i algoritmy): dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.07* [Optimization of train operation modes taking into account traffic safety criteria (methods and algorithms): dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.22.07]. Omsk: OmGUPS Publ., 2000, 353 p. (In Russian)
9. Popov V. E., Elsakov G. M., Levin I. G. Ob algoritme otpuska pnevmaticheskikh tormozov [On the algorithm of pneumatic brake release]. *Avtomatizatsiya upravleniya tormozami poezda: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automation of train brake control: interuniversity. coll. sci. t.]. Sverdlovsk: UrEMIIT Publ., 1980, pp. 37–42. (In Russian)

10. Pytlyakov V. A. Rezul'taty ispytaniy avtomaticheskikh tormozov gruzovykh poezdov na Zabaykalskoy zheleznoy doroge [Results of testing automatic brakes of freight trains on the Trans-Baikal railway]. *Avtomatizatsiya upravleniya tormozami poezda: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automation of train brake control: interuniversity. collection of scientific papers]. Sverdlovsk: UrEMIIT Publ., 1980, pp. 52–55. (In Russian)

11. Kulaga A. A. *Povyshenie effektivnosti raboty tormoznykh sistem dlinnobaznykh konteynernykh platform: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07* [Improving the efficiency of braking systems of long-base container platforms: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.22.07]. Moscow, 2019, 120 p. (In Russian)

12. Sokolov A. B. *Vozdukhoraspredeliteli: nastoyashchee i perspektivy* [Air distributors: present and prospects]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2006, Iss. 8, pp. 73–75. (In Russian)

13. Pustyl'nik E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy* [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 288 p. (In Russian)

Received: July 30, 2025

Accepted: August 21, 2025

Author's information:

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; kurilkin@pgups.ru

Alexander V. ISAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; isaev@avtomashinist.ru

Valery F. TANAEV — It@pgups.ru

Veniamin G. POGUDIN — It@pgups.ru

Anna A. ROMANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; anyromanova@inbox.ru