

УДК 629.4.072.2

Методика уточненного расчета давления в тормозных цилиндрах поезда с учетом влияния утечек сжатого воздуха, распределенных по длине тормозной магистрали

Д. В. Осипов

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Для цитирования: Осипов Д. В. Методика уточненного расчета давления в тормозных цилиндрах поезда с учетом влияния утечек сжатого воздуха, распределенных по длине тормозной магистрали // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 51–63. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-51-63

Аннотация

Цель: разработка методики оценки величины заполнения тормозных цилиндров грузового поезда с учетом величины утечки воздуха распределенной по длине тормозной магистрали. В качестве исходных данных для определения давления тормозных цилиндров использовать падение давления в тормозной магистрали по длине состава, величину зарядного давления в голове поезда и ступени разрядки уравнительного резервуара. **Методы:** экспериментальное исследование газодинамических процессов в ключевых объемах тормозной системы в головной и хвостовой частях поезда, таких как тормозная магистраль и тормозной цилиндр. Аппроксимация экспериментальных данных, полученных с тормозной системы реального поезда с выведением обобщенных уравнений. **Результаты:** в результате исследований получены уточненные математические модели, позволяющие определять давление в тормозном цилиндре любого вагона, а также среднее значение давления в тормозных цилиндрах по длине поезда с учетом величины утечек зарядного давления в головной части поезда и длины состава в вагонах. **Практическая значимость:** применение новой методики расчета величины заполнения тормозных цилиндров позволит учитывать влияние длины тормозной магистрали на величину тормозной силы каждого вагона поезда. Это поможет скорректировать уравнение движения поезда и повысить точность расчета тормозного пути грузовых поездов с учетом технического состояния тормозной сети.

Ключевые слова: тормозной цилиндр, тормозная магистраль, зарядное давление, величина разрядки, грузовой поезд.

Введение

Эффективность процесса торможения грузового поезда зависит от большого числа внешних и внутренних факторов. Воздействие этих факторов оказывает влияние на конечную длину тормозного пути и величину продольно-динамических реакций в поезде, что приводит к самопроизвольным срабатываниям [1–3]. К внешним факторам можно отнести крутизну уклона, погодные условия и др.; к внутренним — некоторые особенности протекания газодинамических процессов в тормозной системе при торможении, отпуске и зарядке. Среди них наиболее актуальными являются вопросы распределения давления по длине тормозной магистрали (ТМ) и величина наполнения тормозных цилиндров (ТЦ) по длине поезда.

Необходимость увеличения массы поездов приводит к увеличению числа вагонов в составе, следовательно, увеличивается длина тормозной магистрали. Это приводит к неравномерному распределению зарядного давления по длине поезда. Основная причина — это наличие утечек в местах межвагонных соединений, вследствие чего давление в хвостовых вагонах всегда ниже давления в головных вагонах.

Актуальность разработки методики уточненного расчета давления в тормозных цилиндрах

Существующие на сегодняшний день методики расчета давления в тормозном цилиндре учитывают режимы загрузки вагонов (1–3), объем камер воздухораспределителя, объем запасного резервуара, выход штока тормозного цилиндра (4), но при этом не учитывают влияние распределения давления в тормозной магистрали на величину заполнения цилиндров [1, 4].

$$P_{ц.пор} = 0,405(0,15P_M + 2,4\Delta P_M - 0,115), \quad (1)$$

$$P_{ц.ср} = 0,92(0,15P_M + 2,4\Delta P_M - 0,13), \quad (2)$$

$$P_{ц.пор} = 1,64(0,15P_M + 2,4\Delta P_M - 0,15), \quad (3)$$

где P_M — абсолютное зарядное давление в тормозной магистрали, МПа;
 ΔP_M — величина ступени разрядки тормозной магистрали, МПа.

$$P_{ц.мах} = \frac{(V_{вр} + V_{шт})P_{ат} + V_{зр}P_{зар}}{V_{вр} + Fh_{мах} + V_{зр}}, \quad (4)$$

где $V_{вр}$, $V_{шт}$, $V_{зр}$ — вредный объем тормозного цилиндра, объем за счет недохода поршня в исходное положение и объем запасного резервуара, дм³;

$P_{ат}$, $P_{зар}$ — атмосферное и зарядное давление, кгс/см²;

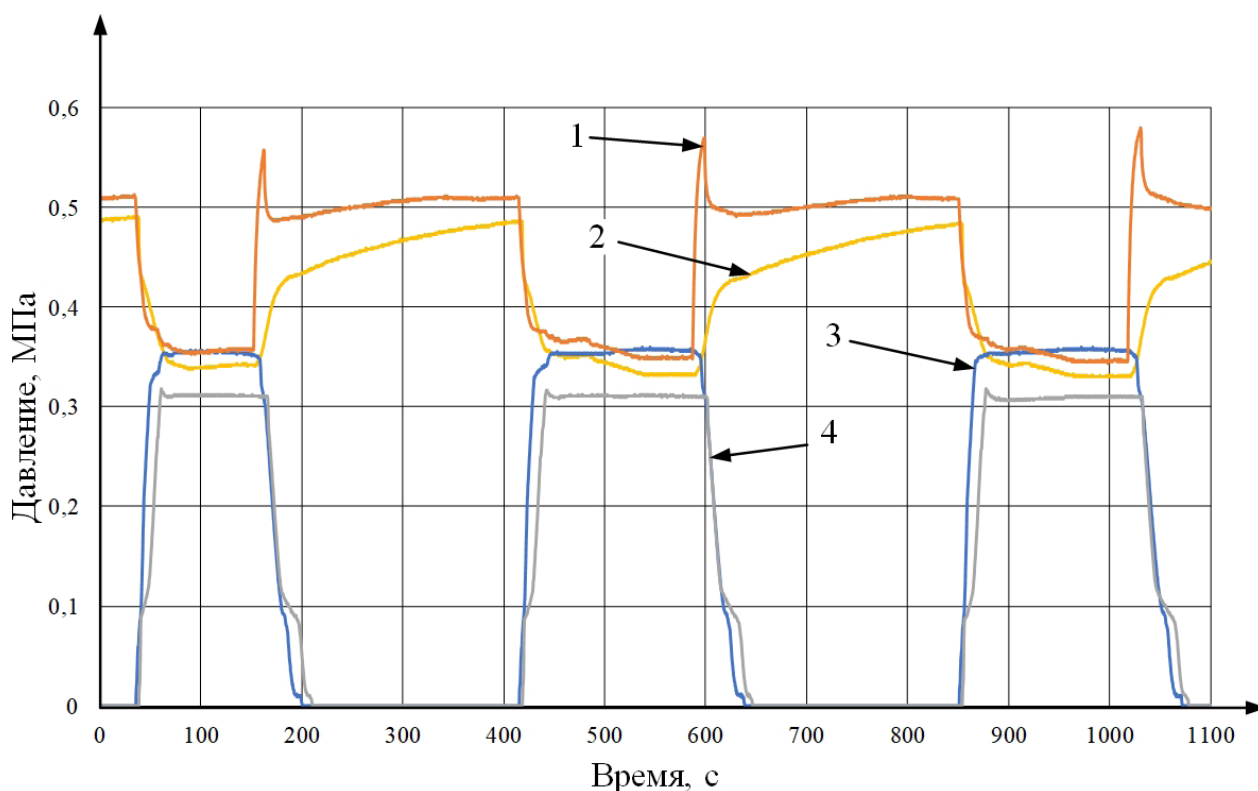
F — площадь поршня тормозного цилиндра, дм²;

$h_{мах}$ — максимальный выход штока тормозного цилиндра, дм.

Это является значимой научной проблемой, так как методология тормозных расчетов для подвижного состава и уравнение движения поезда тоже не учитывают влияния распределения давления по длине поезда на величину тормозной силы и, как следствие, на длину тормозного пути [5–7]. Следовательно, разработка новой методики оценки величины наполнения тормозного цилиндра поможет более точно рассчитывать тормозной путь и предсказывать поведение каждого вагона в отдельности для повышения безопасности движения.

Разработка методики уточненного расчета давления в тормозных цилиндрах

На основе экспериментальных исследований было выявлено, что тормозной магистрали последней трети состава после отпуска необходимо порядка 300 секунд для восстановления давления до уровня зарядного (рис. 1). Исследования проводились на грузовом поезде с составом из 70 четырехосных вагонов.



1, 3 — графики зависимости давления от времени в тормозном цилиндре и тормозной магистрали первого вагона; 2, 4 — графики зависимости давления от времени в тормозном цилиндре и тормозной магистрали 70-го вагона

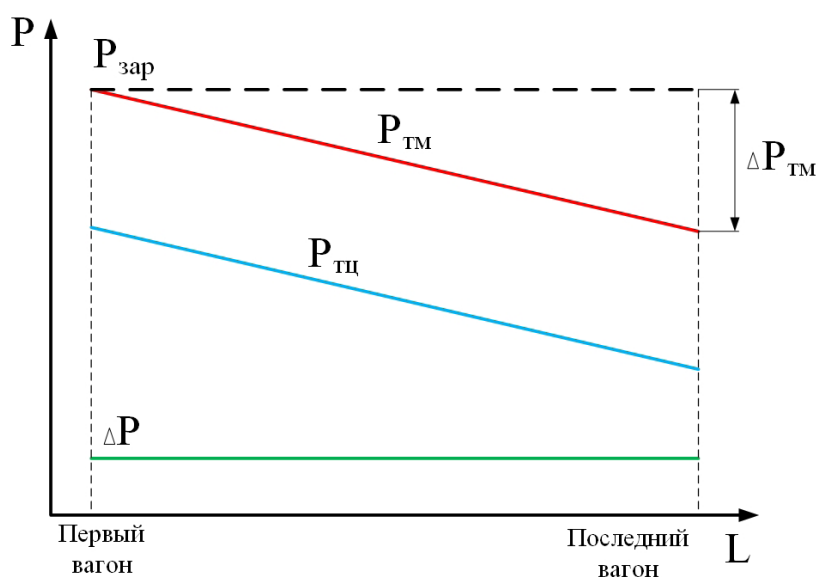
Рис. 1. Пневматические процессы в тормозной системе грузового поезда

Как видно из графика, уровень давления в тормозном цилиндре хвостового вагона ниже, чем давление в тормозном цилиндре головного вагона. Следовательно, эффективность работы тормозной системы при последующих торможениях снижается.

Разработка методики уточненного расчета давления в тормозных цилиндрах проводилась на основе экспериментальных данных, полученных для грузового груженого поезда, состоящего из 70 полувагонов. Следовательно, ее применение для моделирования поездов с составом из платформ или цистерн потребует дополнительного уточнения. Тормозные колодки на грузовых поездах устанавливаются композиционные, поэтому воздухораспределитель установлен на средний

режим загрузки. Расчет проводился для двух уровней разрядки уравнивающего резервуара (УР).

Для упрощения разработки математической модели заполнения тормозных цилиндров составим графическую модель зависимости газодинамических процессов в тормозной системе поезда от его длины в линейной постановке (рис. 2). Данная модель наглядно показывает влияние величины распределенной по длине тормозной магистрали утечки сжатого воздуха на величину заполнения тормозных цилиндров по длине состава на основании графиков, представленных на рис. 1.



$P_{зар}$ — зарядное давление в тормозной магистрали; $P_{тм}$ — давление в тормозной магистрали поезда; $P_{тц}$ — давление в тормозном цилиндре; ΔP — разрядка тормозной магистрали; $\Delta P_{тм}$ — разница давлений тормозной магистрали в головной и хвостовой частях поезда при наличии распределенной утечки по длине тормозной магистрали

Рис. 2. Графическая модель газодинамических процессов в тормозной системе поезда

Если принять допущение, что разрядка тормозной магистрали каждого вагона одинакова (рис. 2), то давление в тормозной магистрали каждого вагона после ступени разрядки можно определить как:

$$P_{тм}^i = P_{зар}^i - \Delta P, \quad (5)$$

где $P_{зар}^i$ — зарядное давление в тормозной магистрали каждого вагона, МПа; ΔP — величина ступени разрядки уравнивающего резервуара, МПа.

Как видно по графику (рис. 1), давление в тормозной магистрали в головной и хвостовой части вагонов отличается. Такое распределение возможно описать функцией зависимости величины зарядного давления от длины поезда

в физических четырехосных вагонах $P_{\text{зар}}(L)$. В ходе проведения экспериментальных исследований было выполнено порядка десяти циклов торможений. В результате аппроксимации полученных данных получили две линейные зависимости для случаев, соответствующих наибольшему и наименьшему давлению из всей выборки (рис. 3).

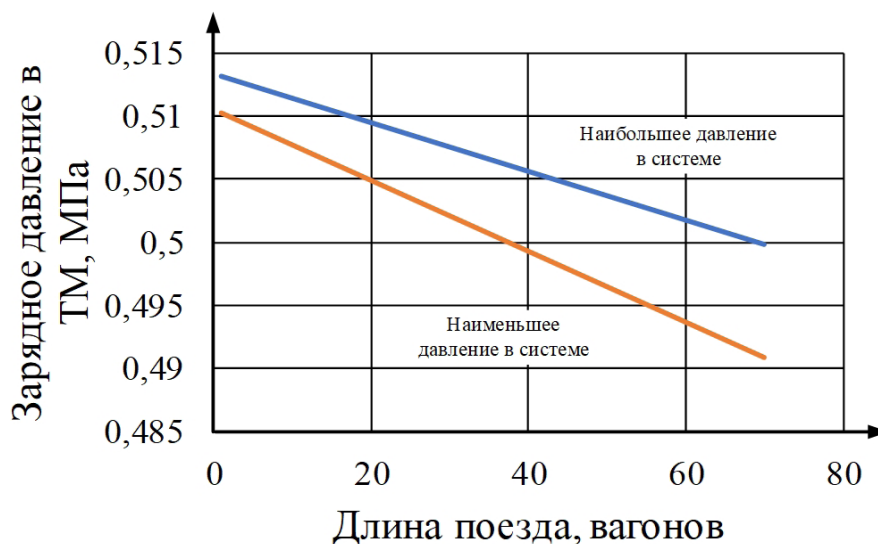


Рис. 3. Зависимость зарядного давления в тормозной магистрали от длины состава

Полученные зависимости описываются уравнением вида:

$$y = -kx + b. \quad (6)$$

В данном случае коэффициент k определяет уровень снижения давления на единицу длины поезда x , а свободная переменная b является величиной зарядного давления в первом вагоне поезда. С учетом этого запишем уравнение распределения давления по длине состава в виде:

$$P_{\text{зар}}^i = -0,0002L + P_{\text{зар}}, \quad (7)$$

где L — длина поезда в вагонах;

$P_{\text{зар}}$ — зарядное давление в первом вагоне поезда, МПа.

Данное выражение было получено путем аппроксимации и представляет среднее значение между случаями максимального и минимального давлений в системе.

С учетом выражения (7) давление в тормозной магистрали i -го вагона после ступени разрядки примет вид:

$$P_{\text{тм}}^i = -0,0002L + P_{\text{зар}} - \Delta P. \quad (8)$$

Далее необходимо определить функцию величины давления в тормозном цилиндре вагонов от установившегося давления в тормозной магистрали до разрядки $P_{тц}$ ($P_{тм}$) (рис. 4).

В эксперименте было задействовано три вагона: головной, средний и хвостовой.

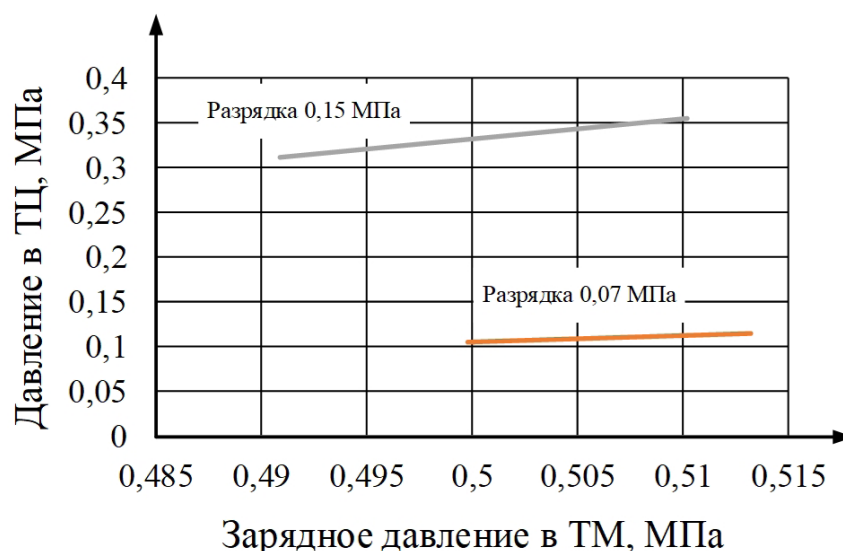


Рис. 4. Зависимость давления тормозного цилиндра от распределенного по длине давления в тормозной магистрали

В этом случае функция также принимает вид линейного уравнения:

$$y = z_{1,2}x - c_{1,2}, \quad (9)$$

где $z_{1,2}$ — коэффициент, зависящий от величины разрядки тормозной магистрали и величины давления в тормозной магистрали головного вагона для ступени разрядки 0,07 и 0,15 МПа;

$c_{1,2}$ — коэффициент, зависящий от величины разрядки тормозной магистрали для ступени разрядки 0,07 и 0,15 МПа;

x — величина зарядного давления в тормозной магистрали i -го вагона поезда, $P_{тм}^i$, МПа.

Для того чтобы с помощью итогового выражения имелась возможность определять давление в тормозном цилиндре от величины разрядки и зарядного давления, необходимо установить функции изменения данных коэффициентов.

Для коэффициентов c_1 и c_2 установим функцию зависимости величины давления в тормозном цилиндре от величины ступени разрядки уравнительного резервуара $P'_{тц}(\Delta P)$.

Формула давления в тормозном цилиндре в зависимости от разрядки имеет вид:

$$P'_{\text{тц}} = 2,686\Delta P - 0,06. \quad (10)$$

Следующим этапом необходимо определить уровень давления в тормозном цилиндре хвостового вагона. Для упрощения разницу примем согласно экспериментальным данным и вычтем ее от значения, полученного с помощью формулы (10). Также определим установившееся значение давления в тормозной магистрали после ступени разрядки. На основе полученных данных строим зависимость давления в тормозном цилиндре от давления в тормозной магистрали после разрядки $P'_{\text{тц}}$ ($P^i_{\text{тм}}$) (рис. 5).

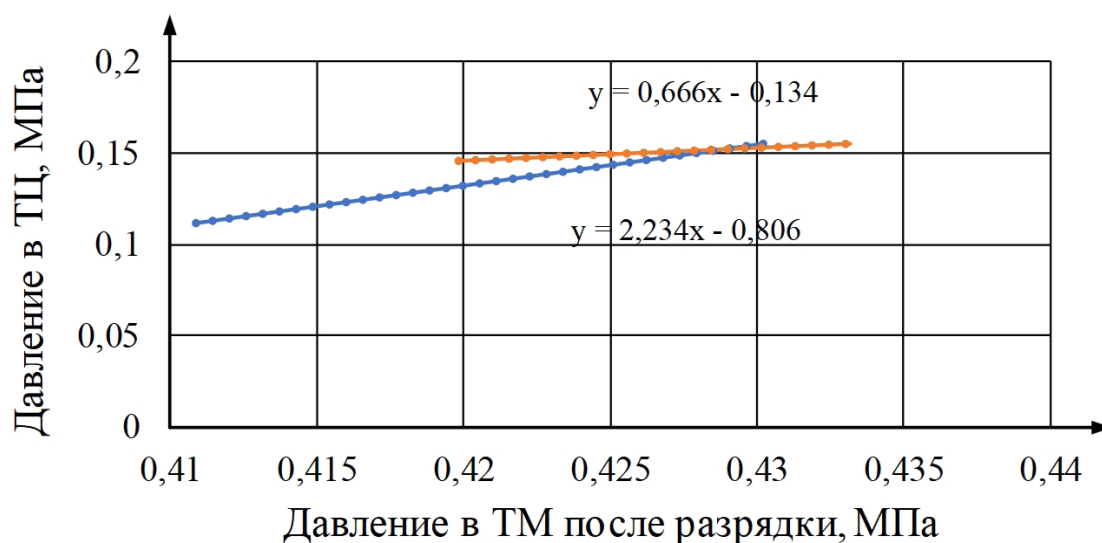


Рис. 5. Зависимость давления в тормозном цилиндре от давления в тормозной магистрали после разрядки

При помощи встроенных инструментов интерполяции в MS Excel получаем значения коэффициентов c_1 и c_2 в зависимости от величины разрядки уравнительного резервуара. Для этого в выражение (10) подставляем ΔP с шагом 0,02 МПа, изменяя тем самым уровень наполнения тормозного цилиндра $P'_{\text{тц}}$. При изменении ступени разрядки в выражениях (11) и (12) меняется только свободная переменная, которая и является нашим искомым коэффициентом.

Для ступени разрядки в диапазоне от 0,08 до 0,15 МПа уравнение имеет вид:

$$P'_{\text{тц}} = 2,23P^i_{\text{тм}} - 0,806 \dots 0,462. \quad (11)$$

Для ступени разрядки в диапазоне от 0,02 до 0,08 МПа:

$$P'_{\text{тц}} = 0,666P^i_{\text{тм}} - 0,335 \dots 0,134. \quad (12)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициентов в зависимости от степени разрядки.

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициентов c_1 и c_2 в зависимости от величины разрядки уравнивающего резервуара

Степень разрядки, МПа	Значение коэффициента	Выражение
0,02	0,335	Выражение (12)
0,04	0,268	
0,06	0,201	
0,08	0,134	
0,08	0,806	Выражение (11)
0,1	0,7078	
0,12	0,609	
0,14	0,511	
0,15	0,462	

После этого строим зависимость величины коэффициентов c_1 и c_2 от величины разрядки (рис. 6).

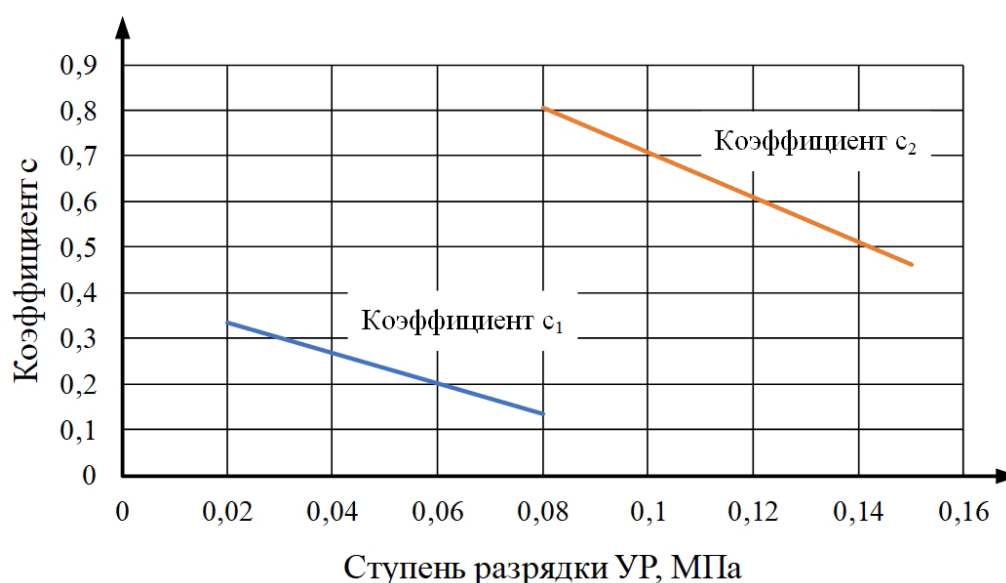


Рис. 6. Зависимость коэффициентов c_1 и c_2 от величины разрядки уравнивающего резервуара

В виде математического выражения коэффициенты равны:

– для разрядки 0,02 до 0,08 МПа:

$$c_1 = -3,35\Delta P + 0,402; \quad (13)$$

– для разрядки от 0,08 до 0,15 МПа уравнение имеет вид:

$$c_2 = -4,92\Delta P + 1,20. \quad (14)$$

После всех математических преобразований итоговое выражение для определения давления в тормозном цилиндре в зависимости от длины поезда, зарядного давления и величины разрядки уравнительного резервуара примет вид:

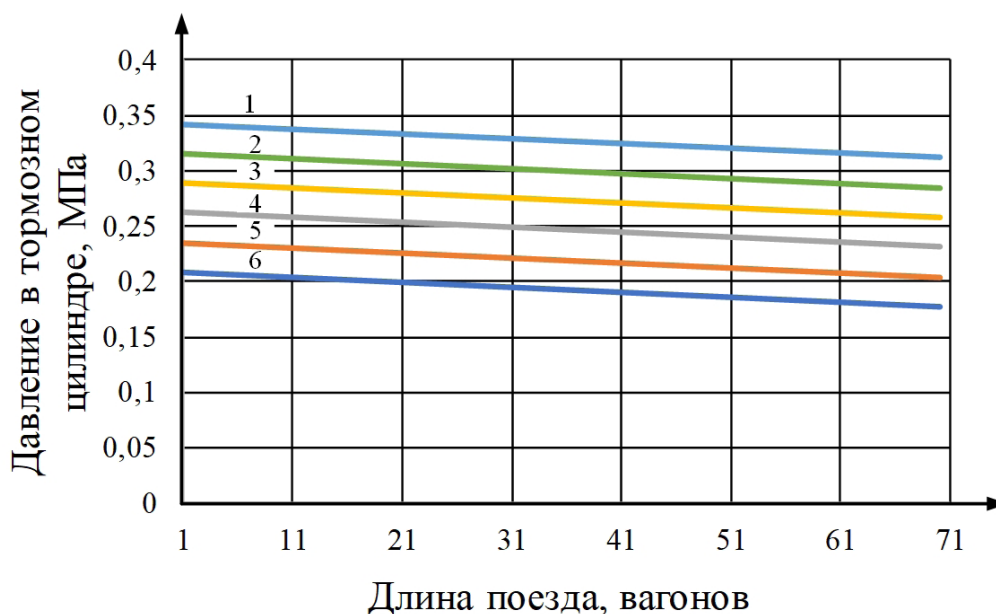
– для разрядки 0,02 до 0,08 МПа:

$$P_{\text{тц}} = \frac{-0,664\Delta P + 0,342}{P_{\text{зар}} - \Delta P} \cdot \left((-0,0002L + P_{\text{зар}}) - \Delta P \right) + 3,35\Delta P - 0,402; \quad (15)$$

– для разрядки от 0,08 до 0,15 МПа:

$$P_{\text{тц}} = \frac{-2,234\Delta P + 1,14}{P_{\text{зар}} - \Delta P} \cdot \left((-0,0002L + P_{\text{зар}}) - \Delta P \right) + 4,92\Delta P - 1,20. \quad (16)$$

Результаты моделирования заполнения тормозных цилиндров поезда по выражению (16) приведены на рис. 7. Расчет проводился для случая зарядного давления 0,51 МПа, что соответствует данным, полученным экспериментальным путем. Величины разрядки использовались от 0,1 до 0,15 МПа при одинаковой величине утечки воздуха из тормозной магистрали.



1–5 — давление в тормозном цилиндре в зависимости от ступени разрядки тормозной магистрали с шагом 0,01 МПа в диапазоне 0,1–0,15 МПа

Рис. 7. График зависимости давления в тормозных цилиндрах от длины поезда

В результате проверки сходимости предложенной модели определения давления в тормозных цилиндрах с использованием полученных выражений погрешность не превышает 4%.

Так как одним из ключевых элементов данной математической модели является влияние распределенной утечки в тормозной магистрали на распределение зарядного давления по длине поезда и, как следствие, на величину давления в тормозных цилиндрах, необходимо дополнительно через выражение (7) вывести дополнительный коэффициент от влияния утечки $K_{ут}$. Данный коэффициент позволит определять величину утечки на основании замеров давления в тормозной магистрали хвостового вагона при помощи манометров в зависимости от длины поезда.

Меняя коэффициент k , полученный в результате экспериментальных исследований в выражении (7) в диапазоне $-0,0001 \dots -0,001$ и получая разницу давлений тормозной магистрали между величиной зарядного давления и установившегося в последнем вагоне $\Delta P_{тм}$, строим зависимость коэффициента $k = -0,0001 \dots -0,001$ от $\Delta P_{тм}$ (рис. 8).

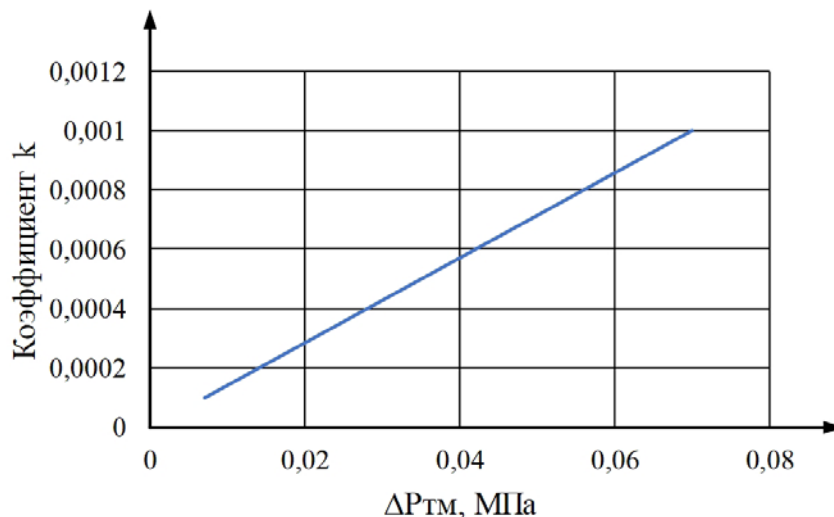


Рис. 8. График зависимости коэффициента k от падения давления в тормозной магистрали по длине поезда

Применяя метод интерполяции, получаем, что коэффициент $K_{ут}$ равен:

$$K_{ут} = 0,143\Delta P_{тм}. \quad (17)$$

После подстановки в формулу (7) полученного коэффициента запишем уравнение (7) в виде:

$$P_{зар}^i = -0,0143\Delta P_{тм}L + P_{зар}. \quad (18)$$

Дополнительно введенный в математическую модель заполнения тормозного цилиндра коэффициент $K_{ут}$ позволит моделировать влияние утечек различной интенсивности на величину заполнения тормозных цилиндров по длине состава.

Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные, теоретические и аналитические исследования позволили разработать методику расчета величины заполнения тормозных цилиндров с учетом зарядного давления в тормозной магистрали, величины разрядки уравнительного резервуара и длины поезда. Единственным недостатком данной методики является то, что представленные выражения получены для частного случая и требуют дополнительных экспериментальных исследований для уточнения математической модели. Проведение большего количества экспериментальных исследований пневматических процессов на грузовых поездах позволит повысить сходимость модели, а также исключить влияние случайных характеристик воздухораспределителей на уровень заполнения тормозного цилиндра [8].

Кроме того, учет влияния длины поезда при оценке заполняемости цилиндров в дальнейшем позволит рассчитывать давление в тормозных цилиндрах при организации усиленного питания запасного резервуара с помощью дополнительного трубопровода питательной магистрали [9, 10]. Это станет возможным благодаря некоторому коэффициенту, позволяющему учесть изменение распределения давления в тормозной магистрали по длине состава в связи с новым способом организации тормозной системы.

Библиографический список

1. Автоматические тормоза подвижного состава: учеб. пособие для вузов ж/д транспорта / В. Р. Асадченко М.: Маршрут, 2006. 392 с.
2. Иванов П. Ю., Мануилов Н. И., Дульский Е. Ю. и др. Определение причин самопроизвольных срабатываний тормозов поезда в границах Красноярской железной дороги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 3 (59). С. 68–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76. EDN YSFXTV.
3. Иванов П. Ю., Михальчук Н. Л., Макарова Е. И. и др. Процесс самопроизвольного срабатывания пневматических тормозов грузового подвижного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1 (65). С. 60–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).60-66.
4. Тормоза железнодорожного подвижного состава: вопросы и ответы (3-е изд., стереотипное) / В. Г. Иноземцев. М.: Транспорт, 1987. 207 с., ил., табл.
5. Буйносов А. П., Федоров Е. В. Определение эффективности тормозов железнодорожного подвижного состава в пути следования // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2018. № 8. С. 7–11. EDN MFVXUD.

6. Повышение эффективности пневматической тормозной системы грузового подвижного состава в режиме зарядки и отпуска: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Хамнаева. СПб., 2023. 18 с.
7. Правила тяговых расчетов для поездной работы, 2016. 510 с.
8. Разработка метода системного анализа автотормоза грузового подвижного состава: дис. ... докт. техн. наук / В. А. Карпычев. М., 2000. 316 с. EDN QDMCUV.
9. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Хамнаева А. А. и др. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однотрубным и двухтрубным питанием // Вестник РГУПС. 2020. № 3 (79). С. 35–42. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_3_35.
10. Осипов Д. В., Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю. и др. Двухтрубная тормозная система на железнодорожном подвижном составе // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 4–5 (101–102). С. 38–41. EDN ZGBZCC.

Дата поступления: 01.05.2024

Решение о публикации: 31.05.2024

Контактная информация:

ОСИПОВ Дмитрий Валерьевич — аспирант; osipovdnor@mail.ru

A method for the refined calculation of pressure in the brake cylinders of a train, taking into account the influence of compressed air leaks distributed along the length of the brake line

D. V. Osipov

Irkutsk State Transport University, 15 Chernyshevsky Street, Irkutsk, 664074, Russia

For citation: *Osipov D. V.* A method for the refined calculation of pressure in the brake cylinders of a train, taking into account the influence of compressed air leaks distributed along the length of the brake line // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 51–63. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-51-63 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop a methodology for estimating the filling value of the brake cylinders of a freight train, taking into account the amount of air leakage distributed along the length of the brake line. As initial data for determining the pressure of the brake cylinders, use the pressure drop in the brake line along the length of the train, the amount of charging pressure in the head of the train and the discharge stage of the equalizing tank. **Methods:** experimental study of gas dynamic processes in key volumes of the braking system in the head and tail parts of the train, such as: brake line and brake cylinder. Approximation of experimental data obtained from the braking system of a real train with the derivation of generalized equations. **Results:** as a result of the research, refined mathematical models were obtained that allow determining the pressure in the brake cylinder of any car, as well as the average pressure in the brake cylinders along the length of the train, taking into account the amount of leakage of the charging pressure in the head of the train and the length of the train in the cars. Practical significance: The application of a new methodology for calculating the filling value of brake cylinders will allow taking into account the influence of the length of the brake line

on the braking force of each train car. This will help to correct the equation of train movement and improve the accuracy of calculating the braking distance of freight trains, taking into account the technical condition of the braking network.

Keywords: brake cylinder, brake line, charging pressure, discharge value, freight train.

References

1. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: ucheb. posobie dlya vuzov zh/d transporta / V.R. Asadchenko. M.: Marshrut, 2006. 392 s. (In Russian)
2. Ivanov P. Yu., Manuilov N.I., Dul'skij E. Yu. i dr. Opredelenie prichin samoproizvol'nyh srabatyvanij tormozov poezda v granicah Krasnoyarskoj zheleznoj dorogi // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2018. № 3 (59). S. 68–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76. EDN YSFXTV. (In Russian)
3. Ivanov P. Yu., Mihal'chuk N.L., Makarova E.I. i dr. Process samoproizvol'nogo srabatyvaniya pnevmaticheskikh tormozov gruzovogo podvizhnogo sostava // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2020. № 1 (65). S. 60–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).60-66. (In Russian)
4. Tormoza zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: voprosy i otvety. (3-e izd., stereotipnoe) / V.G. Inozemcev. M.: Transport, 1987. 207 s., il., tabl. (In Russian)
5. Bujnosov A. P., Fedorov E. V. Opredelenie effektivnosti tormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava v puti sledovaniya // *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik*. 2018. № 8. S. 7–11. EDN MFVXUD. (In Russian)
6. Povyshenie effektivnosti pnevmaticheskoy tormoznoj sistemy gruzovogo podvizhnogo sostava v rezhime zaryadki i otpuska: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / A.A. Hamnaeva. SPb., 2023. 18 s. (In Russian)
7. Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty, 2016. 510 s. (In Russian)
8. Razrabotka metoda sistemnogo analiza avtotormoza gruzovogo podvizhnogo sostava: dis. ... dokt. tekhn. nauk / V.A. Karpichev. M., 2000. 316 s. EDN QDMCUV. (In Russian)
9. Ivanov P. Yu., Dul'skij E. Yu., Hamnaeva A. A. i dr. Sravnitel'nyj analiz tormoznyh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvuhtrubnym pitaniem // *Vestnik RGUPS*. 2020. № 3 (79). S. 35–42. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_3_35. (In Russian)
10. Osipov D. V., Ivanov P. Yu., Dul'skij E. Yu. i dr. Dvuhtrubnaya tormoznaya sistema na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave // *Transport Rossijskoj Federacii*. 2022. № 4–5 (101–102). S. 38–41. EDN ZGBZCC. (In Russian)

Received: 01.05.2024

Accepted: 31.05.2024

Author's information:

Dmitry V. OSIPOV — Postgraduate Student; osipovdnor@mail.ru