APDL software package under test pressure loading. The locations of stress concentration in the heads are studied. It is found that using a shortened elliptical head instead of a torispherical one reduces the maximum equivalent stresses by 38 %. Furthermore, the use of a short elliptical head allows increasing the useful volume of the tank wagon by an average of 0,4 %. Based on the obtained data, the use of "short" elliptical heads is recommended.

Keywords: tank wagon, short elliptical head, elliptical head, torispherical head, strength of heads, stress concentration, tank volume, test pressure loading, finite element analysis

УДК 629.421.2

А. М. Рогов, Д. Н. Курилкин

Совершенствование методов управления пневматическим тормозом грузового поезда

Рогов Александр Михайлович — аспирант 1-го курса группы ПСА-509 кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство»
Курилкин Дмитрий Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство»

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Современные системы автоматического управления пневматическими тормозами грузового поезда не в полной мере отвечают требованиям к управляемости при регулировочном торможении. В статье предлагается рассмотреть иной подход: использовать работу тормозной силы как управляющее воздействие в тормозных расчетах. Исследования показали, что величину работы тормозных сил в процессе отпуска можно регулировать за счет изменения тормозной силы. Такой способ поможет обеспечить прицельное регулировочное торможение и повысить управляемость системы пневматического тормоза.

Ключевые слова: прицельное торможение, управляемость тормозов, работа тормозной силы, пневматическое торможение, тормозная сила

В настоящее время пневматическая тормозная система активно применяется на железнодорожном транспорте. Колодочные или дисковые тормозные устройства, приводимые в действие за счет силы сжатого воздуха, обязательно устанавливаются на каждую единицу подвижного состава, эксплуатируемого на территории Российской Федерации.

Несмотря на ряд неоспоримых достоинств, пневматическая тормозная система обладает и существенными недостатками, одним из которых является ее низкая управляемость при регулировочных торможениях. Под управляемостью понимается способность системы переместить объект в любую точку пространства координат путем изменения его состояния в течение заданного интервала времени [1].

Данная проблема обусловлена особенностями тормозной системы грузовых поездов и заключается в перепадах давления между головным и хвостовым вагонами, ограниченной скорости распространения тормозной волны, конструктивных особенностях тормозного оборудования, условиях окружающей среды.

Учитывая, что в реальных условиях эксплуатации добиться одинаковой ступени торможения (ступени разрядки тормозной магистрали) практически невозможно, каждое торможение представляет случайный процесс, что приводит к разнице в реализуемых тормозных усилиях.

Тормозные усилия, реализуемые при торможении, напрямую зависят от давления в тормозных цилиндрах (ТЦ). Процесс торможения может быть представлен в виде графика (рис. 1), в котором можно выделить три условных этапа.

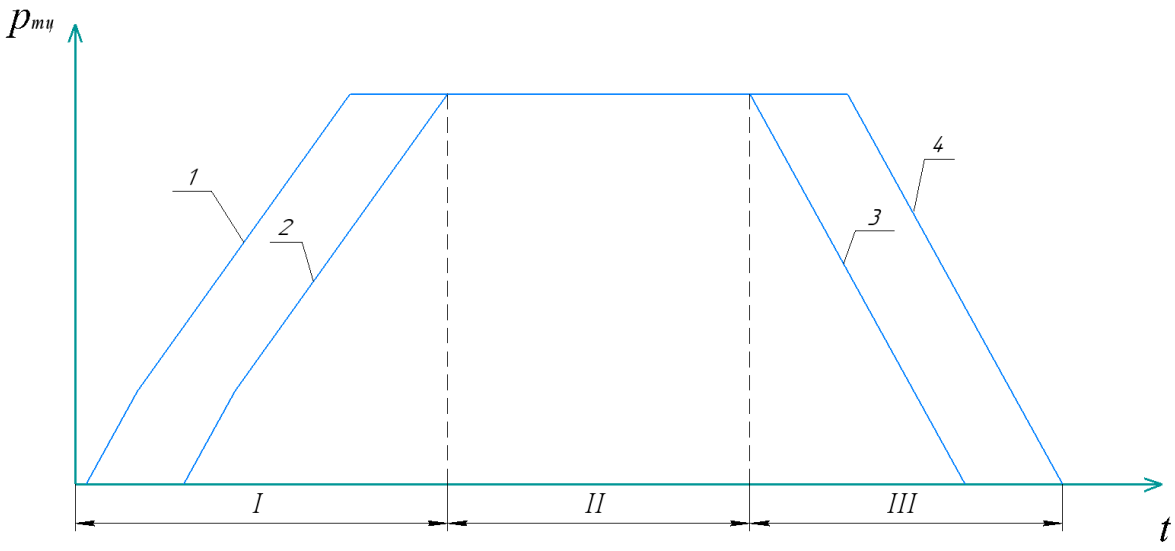


Рис. 1. Диаграмма наполнения и отпуска тормозных цилиндров в процессе торможения: $p_{тц}$ — давление в тормозном цилиндре; t — время. 1 — торможение первой единицы подвижного состава; 2 — торможение последней единицы подвижного состава; 3 — отпуск первой единицы подвижного состава; 4 — отпуск последней единицы подвижного состава. I, II, III — этапы торможения

На первом этапе происходит наполнение ТЦ сжатым воздухом, давление постепенно возрастает до определенного уровня, зависящего от примененной ступени торможения. При этом время начала наполнения ТЦ головного и хвостового вагонов будет

отличаться в зависимости от длины тормозной магистрали и скорости срабатывания воздухораспределителя. После достижения в ТЦ хвостового вагона некоторого максимального установившегося значения давления тормозные усилия, развиваемые тормозным оборудованием поезда, достигают своего максимума и с некоторыми допущениями могут считаться постоянными. Третий этап начинается с момента постановки устройства управления тормозами (ручки крана машиниста) в отпускное положение. Сжатый воздух, находящийся в ТЦ, выпускается не мгновенно, а это означает, что поезд еще некоторое время продолжит замедляться под действием остаточных тормозных усилий. При этом будет наблюдаться та же разница во времени начала снижения давления в ТЦ головного и хвостового вагонов, что и на этапе наполнения ТЦ.

В то время как этапы наполнения ТЦ сжатым воздухом и устойчивого торможения активно изучались уже многие годы, процессы, связанные с отпуском тормозов, исследованы недостаточно. Определение закономерностей и возможность предварительного расчета процессов отпуска тормозов являются необходимыми этапами исследований для повышения управляемости тормозов грузового поезда.

Повышение управляемости пневматической тормозной системы позволит добиться увеличения энергоэффективности подвижного состава за счет уточнения тяговых и тормозных расчетов. Также управляемость тормозной системы является важнейшей составляющей в реализации режима виртуальной сцепки, при которой необходимо обеспечивать устойчивость пакета поездов.

Решением проблемы недостаточной управляемости инженеры занялись еще в начале 1980-х годов. Результатом их трудов стала система автоматического управления тормозами (САУТ), которая, пройдя ряд модификаций, до сих пор используется на железнодорожном транспорте. Применяемые в ней алгоритмы позволяют в том числе поддерживать установленные ограничения скорости с применением пневматического тормоза. Однако в случаях, когда мы говорим о прицельном торможении, удовлетворительная точность достигается только при выполнении остановочных торможений перед запрещающим сигналом [2].

При управлении электропневматическими тормозами САУТ имеет возможность выполнять ступенчатое торможение и отпуск, а при управлении пневматическими тормозами, по условию безопасности, САУТ может выполнять только ступенчатое торможение [2]. Таким образом, данная система позиционируется как средство повышения контроля безопасности движения. Более того, ее применение ограничивается необходимостью установки напольных устройств для передачи на локомотив информации о длине блок-участка.

Следующим этапом повышения управляемости тормозов стало появление микропроцессорных систем управления. В скором времени для новой системы были предложены свои решения по повышению управляемости тормозов.

Современные микропроцессорные системы управления поездом включают в себя мощные вычислительные устройства, а также способны хранить информацию о составе поезда и профиле участка. Данные особенности позволяют с высокой точностью рассчитывать текущие динамические характеристики объекта управления и прогнозировать их изменение.

Современные микропроцессорные системы управления торможением грузовых поездов [3] позволяют производить расчет будущей скорости движения (через 60 с после отпуска) и отпуск тормозов поезда после того, как рассчитанная скорость движения достигнет заданной.

Это достижение является качественным скачком в управлении тормозами, однако для своих расчетов система использует заранее заданные детерминированные кривые изменения тормозной силы вагонов в процессе торможения. Как говорилось выше, разброс величины установившегося давления в ТЦ, а также процессы наполнения и отпуска ТЦ в начале и конце торможения характеризуются значительным разбросом, по этой причине в расчетах будет наблюдаться погрешность.

Для повышения точности прогнозного тормозного расчета предлагается перейти от использования в качестве управляющего воздействия расчетного значения тормозной силы $B_т$ к величине ее работы $A_т$, выполненной в процессе торможения. Таким образом получится перейти от случайной величины силы $B_т$ к непрерывно регулируемой за счет времени отпуска тормозов $A_т$.

Важнейшим этапом определения скорости движения подвижного состава после торможения является возможность расчета работы тормозных сил при отпуске $A_{отп}$. Для определения закономерностей отпускных процессов были смоделированы поездки экспериментального грузового состава на участке при различных ступенях торможения и уклонах.

Для расчета уточненных отпускных процессов в грузовом поезде была применена инновационная методика [4]. Ее суть заключается в ведении коэффициента $K_р$, который представляет собой отношение фактического времени отпуска $t_{оф}$ при ступени торможения $\Delta p_{тм}$ ко времени отпуска $t_{о0,65}$ при ступени торможения 0,65 кгс/см^2.

Линейная аппроксимация данного коэффициента позволяет привести диаграмму отпуска тормозных цилиндров к виду (рис. 2).

Для дальнейших расчетов интегрируем методику, изложенную выше, в программу для выполнения тяговых расчетов [5]. В рамках текущего эксперимента введем следующие допущения:

1. Величина ступени торможения в каждом эксперименте является постоянной и состоит из четырех ступеней, величиной 0,5, 0,7, 1,0, 1,3 кгс/см^2 соответственно.

2. Началом эксперимента считается момент постановки прибора управления тормозами в положение отпуска, при этом поезд уже находится на этапе, когда давление в тормозных цилиндрах достигло максимального значения.

3. В эксперименте рассматриваются только регулировочные торможения.

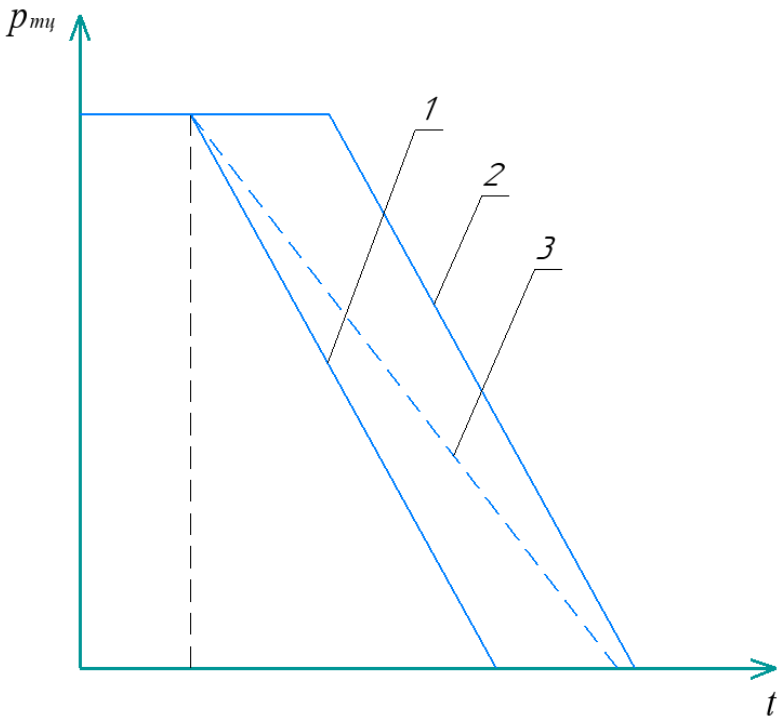


Рис. 2. Диаграмма отпуска тормозных цилиндров по методике:
1 — отпуск первой единицы подвижного состава; 2 — отпуск последней единицы подвижного состава; 3 — расчетная диаграмма отпуска тормоза поезда

В результате получим смоделированный тяговый расчет следующего вида (рис. 3).

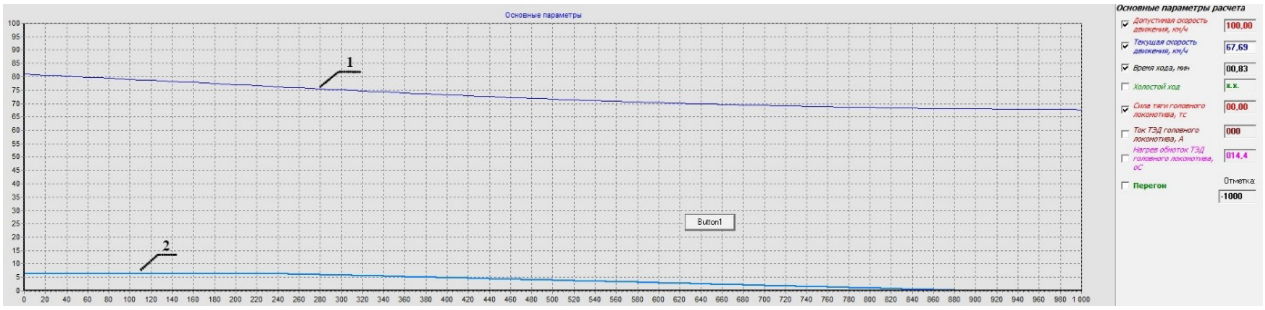


Рис. 3. Расчет траектории движения поезда в режиме отпуска:
1 — скорость движения поезда; 2 — тормозная сила поезда в процессе отпуска

Эксперимент позволяет получить данные о тормозной силе поезда, действующем на него сопротивлении движению, скорости в момент начала и окончания отпуска, а также времени, необходимом на полный отпуск тормозов с шагом 10 м.

Выполнив серию экспериментов на различных скоростях движения и уклонах при различных ступенях торможения, получим выборку данных, которая позволит определить величину работы тормозных сил при отпуске.

Для расчета работы переведем полученные на каждом этапе значения тормозной силы из тс в кДж. Для этого воспользуемся формулой:

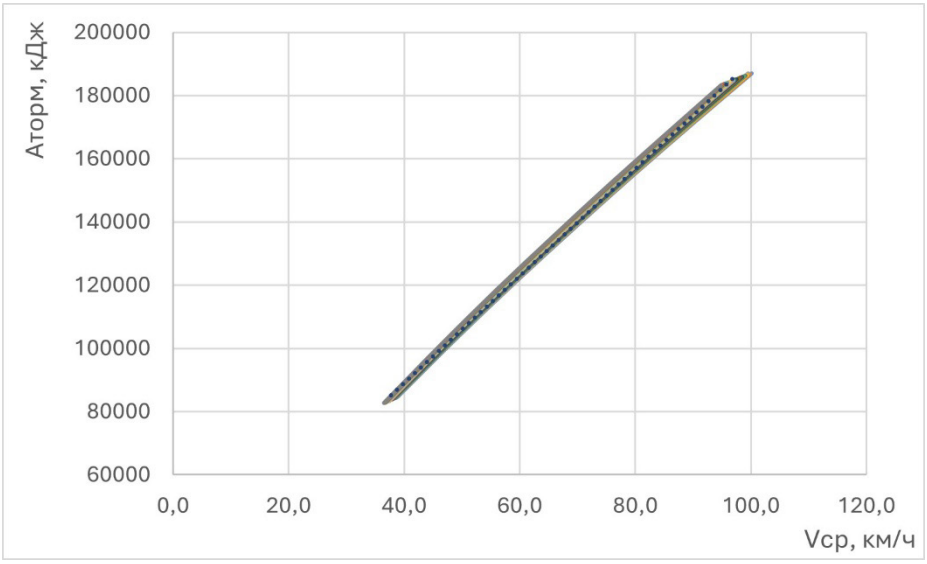
$$A_{\text{отп}} = \sum_{i=1}^{N} 9{,}81 \cdot l \cdot B_i, \qquad (1)$$

где $l = 10$ м — шаг вычисления;

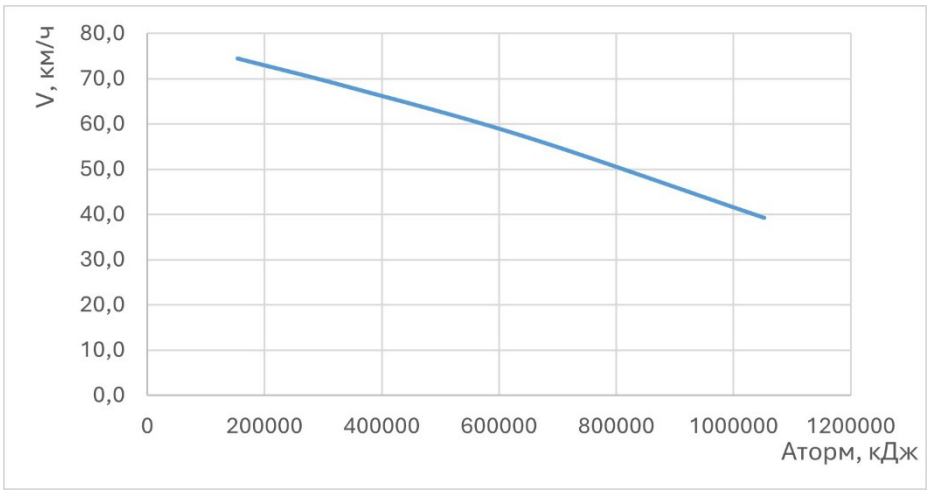
B_i — тормозная сила поезда на этапе вычисления, тс.

В результате были получены графические зависимости работы тормозных сил в режиме отпуска, которые позволяют комплексно оценить влияние различных факторов на изменение расчетной скорости на момент полного отпуска тормозов (рис. 4, *а*, *б*, *в*).

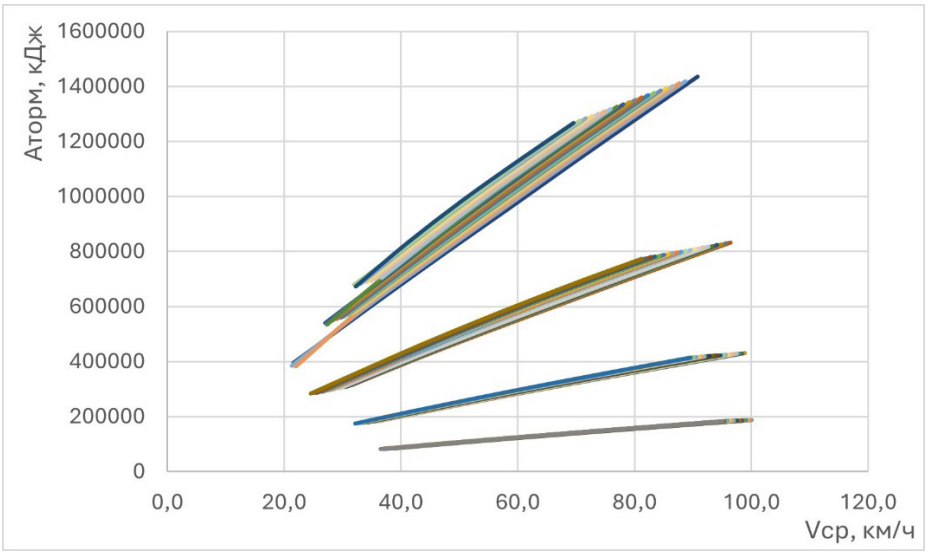
Полученные данные могут быть использованы для реализации алгоритма прицельного торможения грузового поезда за счет уточнения вычислений реальной скорости поезда в конце торможения. Реализация управления процессом торможения по величине работы тормозной силы, определяемой непосредственно в процессе торможения, позволит значительно повысить управляемость пневматических тормозов.



а



б



в

Рис. 4. Диаграммы, отражающие зависимость работы тормозных сил в процессе отпуска тормозов: *а* — зависимость работы тормозных сил от уклона при ступени торможения 0,5 кгс/см²; *б* — зависимость минимальной скорости движения в конце торможения от применяемой тормозной силы отпуска; *в* — зависимость тормозных сил от средней скорости движения в процессе торможения

Список источников

1. Трушин С. М., Скворцова Л. А. Понятия устойчивости, управляемости и достижимости цели в теории систем // Научный аспект. 2024. Т. 42, № 6. С. 5242–5249.
2. Никифоров Б. Д., Головин В. И., Кутыев Ю. Г. Автоматизация управления торможением поездов. М.: Транспорт, 1985. 263 с.
3. Пудовиков О. Е., Муров С. А. Микропроцессорная система автоматического управления пневматическим торможением грузовых длинносоставных поездов // Электротехника. 2014. № 8. С. 29–33.

4. К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов / Д. Н. Курилкин [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22, вып. 3. С. 594–604.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2019663752 / Д. Н. Курилкин; заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВО ПГУПС (RU). Заявл. 14.10.2019.

A. M. Rogov, D. N. Kurilkin

Improving the Control Methods of Pneumatic Brake on a Freight Train

Rogov Alexander Mikhailovich — 1st-Year Postgraduate Student of the Department "Locomotive Facilities"
Kurilkin Dmitrij Nikolaevich — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Locomotive Facilities"

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Modern automatic control systems for freight train pneumatic brakes cannot fully meet the requirements of controllability in the mode of adjustment braking. To solve this problem, the article proposes to consider the possibility of using the work of the braking force as a control action in the braking calculations. It has been established that the amount of work of the braking forces during release can be adjusted by changing the braking force, which will allow for targeted adjustment braking and increase the controllability of the pneumatic brake system.

Keywords: targeted braking, brake control, work of the braking force, pneumatic braking, braking force

УДК 629.4.018+629.4.06

Д. Н. Солин, М. В. Зимакова

Проведение эксплуатационных испытаний цифровой программно-аппаратной платформы контроля технического состояния подвижного состава

Солин Дмитрий Николаевич — аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»
Зимакова Мария Викторовна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»