

A.M. Сафронов*

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько 33, г. Кременчуг, Полтавская обл., 39621, Украина
Телефон: (05366) 6-03-24

**КОНЦЕПЦІЯ ОЦЕНКИ ТОРМОЗНОЇ ЕФФЕКТИВНОСТИ
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ИССЛЕДОВАНЬІЙ В РАЗРЕЗЕ
ТРЕБОВАНИЙ ГОСТ 34434-2018**

Предложена концепция экспериментальных исследований тормозной эффективности грузовых поездов, базирующаяся на компьютерном моделировании на основе реализации имитационной модели в виде дифференциального уравнения движения вагона при торможении. В основу методологии экспериментальных исследований положены универсальные формулы степенных зависимостей параметров торможения.

Оценка тормозной эффективности реализована в виде пакетов прикладных программ для ЭВМ, написанных на языке VBA (Visual Basic for Application) в среде Excel. Программный комплекс позволяет повысить автоматизацию проведения испытаний, точность вычислений, сократить время на проведение испытаний, а также свести к минимуму количество ошибок, вызванных человеческим фактором.

Представленная методология значительно расширяет количество параметров тормозного процесса, используемых для анализа тормозной эффективности грузового поезда по результатам ходовых тормозных испытаний: фактические значения тормозных коэффициентов; тормозные пути грузового поезда не только на площадке, но и на нормированных спусках для заданного количества вагонов в составе поезда с учетом нарастания тормозной силы по составу поезда; фактические значения коэффициентов сцепления колеса и рельса при торможении; замедление грузового вагона и поезда в процессе торможения, а также время торможения.

Приведены примеры расчетных и экспериментальных исследований грузового поезда с колодочным тормозом. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований свидетельствует об их достаточно удовлетворительном совпадении.

Ключевые слова: грузовой поезд, тормозной путь, скорость, тормозной коэффициент, нарастание тормозной силы, математическая модель, линия тренда, тормозная волна.

© Сафронов О.М., 2021

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

O.M. Сафронов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут
вагонобудування»
вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-03-24

КОНЦЕПЦІЯ ОЦІНКИ ГАЛЬМІВНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У РОЗРІЗІ ВИМОГ ГОСТ 34434-2018

Запропоновано концепція експериментальних досліджень гальмівної ефективності вантажних поїздів, що базується на комп'ютерному моделюванні на основі реалізації імітаційної моделі у вигляді диференціального рівняння руху вагона при гальмуванні. В основу методології експериментальних досліджень покладені універсальні формули ступеневих залежностей параметрів гальмування.

Оцінка гальмівної ефективності реалізована у вигляді пакетів прикладних програм для ЕОМ, написаних на мові VBA (Visual Basic for Application) в середовищі Excel. Програмний комплекс дозволяє підвищити автоматизацію проведення випробувань, точність обчислень, скоротити час на проведення випробувань, а також звести до мінімуму кількість помилок, викликаних людським фактором.

Представлена методологія значно розширює кількість параметрів гальмівного процесу, що використовуються для аналізу гальмівної ефективності вантажного поїзда за результатами ходових гальмівних випробувань: фактичні значення гальмівних коефіцієнтів; гальмівні шляхи вантажного поїзда не тільки на площині, а й на нормованих спусках для заданої кількості вагонів у складі поїзда з урахуванням наростання гальмівної сили за складом поїзда; фактичні значення коефіцієнтів зчленення колеса і рейки при гальмуванні; сповільнення вантажного вагона і поїзда в процесі гальмування, а також час гальмування.

Наведені приклади розрахункових і експериментальних досліджень вантажного поїзда з колодковим гальмом. Порівняльний аналіз результатів експериментальних і розрахункових досліджень свідчить про їх досить задовільну збіжність.

Ключові слова: вантажний поїзд, гальмівний шлях, швидкість, гальмівний коефіцієнт, наростання гальмівної сили, математична модель, лінія тренда, гальмівна хвиля.

Железные дороги органично интегрированы в единую транспортную систему Украины. Во взаимодействии с другими видами транспорта они удовлетворяют потребности населения, экономики и государства в перевозках. С учетом значимости железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг, он должен отвечать самым высоким требованиям опережающего развития на

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

инновационной основе. Успешное внедрение инноваций и обеспечение эффективного инновационного развития требует улучшений в сфере создания новых транспортных продуктов, совершенствования процессов управления, направленных на открытие новых возможностей для роста эффективности Украинских железных дорог.

Поэтому дальнейшее развитие железнодорожного транспорта предусматривает перевозку различных грузов в грузовых поездах со скоростями до 160 км/ч, а в перспективе до 200 км/ч, с одновременным возрастанием осевой нагрузки грузовых вагонов до 30 тс (т.е. на 28%). Использование инновационных грузовых вагонов потребовало пересмотра требований к тормозному оборудованию, а также показателям тормозной эффективности, изложенные в ГОСТ 34434-2018 [1].

С этим связано повышение требований к методам оценки тормозной эффективности грузовых поездов и более глубокого анализа тормозных характеристик.

Такие исследования невозможно провести без проверки конструкторских и технических решений на конкретном вагоне в условиях экстренных торможений при различных скоростях движения. Кроме того, определение эффективности тормозной системы является одним из основных видов специальных поездных испытаний опытных вагонов.

Анализ показал, что параметры, которые регламентируют тормозную эффективность грузовых вагонов по требованиям [1], существенно отличаются от ранее принятых [2 - 6].

Основные отличия заключаются:

1. В регламентировании максимальных допустимых тормозных путей грузового поезда на площадке в зависимости от скорости в начале торможения при скоростях: 90 км/ч, 100 км/ч, 120 км/ч, 140 км/ч, 140 км/ч, 160 км/ч независимо от осевой нагрузки.

2. В регламентировании минимальных расчетных коэффициентов сил нажатия композиционных колодок в зависимости от скорости в начале торможения в диапазонах: (> 0 км/ч … = 90 км/ч); (> 90 км/ч … = 100 км/ч); (> 100 км/ч … = 120 км/ч); (> 120 км/ч … = 140 км/ч); (> 140 км/ч … = 160 км/ч) независимо от осевой нагрузки.

3. В регламентировании минимальных допустимых сил нажатия композиционных колодок на ось в пересчете на чугунные колодки для груженых и порожних вагонов в зависимости от осевой нагрузки в принятом диапазоне скоростей.

4. В методике расчета тормозного пути грузового поезда по действительным силам нажатия колодок и действительным коэффициентам трения с учетом времени нарастания тормозной силы при торможении.

Как правило, исследования тормозных систем единиц подвижного состава состоят из двух этапов – на первом этапе осуществляется проверка функционирования тормозной системы в стационарных условиях, на втором – ходовые тормозные испытания. В процессе проведения стационарных и поездных тормозных испытаний оценивается техническое состояние и функционирование тормоза, определяются основные характеристики тормозной системы, а также тормозная эффективность вагона.

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Наиболее важным этапом являются ходовые тормозные испытания, в результате которых получают окончательную информацию о тормозной эффективности единицы подвижного состава.

Ходовые испытания проводят в опытном сцепе с ведущим локомотивом, вагоном-лабораторией и опытным вагоном. Длина тормозного пути определяется тремя способами [8]:

➤ методом бросания, при котором непосредственно определяют расстояние (тормозной путь), пройденное единицей железнодорожного подвижного состава от момента срабатывания тормоза до полной остановки;

➤ методом последовательных торможений, при котором тормозной путь единицы железнодорожного подвижного состава определяют расчетным способом по результатам измерений тормозных путей опытного сцепа с испытываемой единицей железнодорожного подвижного состава и без нее;

➤ методом непосредственных торможений, при котором функции ведущего локомотива и вагона лаборатории должны быть возложены на испытываемую единицу железнодорожного подвижного состава.

Согласно методике испытаний [8], тормозной путь одиночного вагона S_{TO} , м для заданной скорости на горизонтальном участке пути вычисляется по формуле:

$$S_{TO} = \frac{(1+\gamma) \cdot V_0^2 \cdot S_{Tn}}{(1+\gamma) \cdot V_n^2 - 2 \cdot g \cdot i \cdot S_{Tn}} \quad (1)$$

где S_{Tn} - измеренный тормозной путь, м;
 V_0 - заданная скорость начала торможения, м/с;
 V_n - фактическая скорость торможения, м/с;
 g - ускорение свободного падения, м/с²;
 γ - безразмерный коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс.

тормозной путь одиночного вагона;
 i - средний уклон пути на участке торможения (минус — спуск, плюс — подъем), %, определяется по формуле [8]:

$$i_c = \frac{i_1 \cdot S_1 + i_2 \cdot S_2 + \dots + i_n \cdot S_n}{S_c} \quad (2)$$

где S_n - длина участка железнодорожного пути с постоянным профилем, входящая в измеренный тормозной путь, м;

S_c - суммарная длина участков железнодорожного пути, составляющая общий измеренный тормозной путь, м;

i_n - уклон пути каждого из участков пути с постоянным профилем, входящих в измеренный тормозной путь (имеет отрицательное значение для спуска и положительное для подъема), %.

Тормозной путь S_{do} , м, приведенный к максимально допустимой массе единицы подвижного состава и к минимально допустимому давлению в тормозных цилиндрах для соответствующего режима торможения, определяется по формуле [8]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

$$S_{DO} = S_{TO} \cdot \frac{P_{min}}{P_0} \cdot \frac{M_0}{M_{max}} \quad (3)$$

где P_0 - давление в тормозном цилиндре во время испытаний, МПа;

P_{min} - минимально допустимое давление для соответствующего режима торможения, МПа;

M_0 - масса единицы подвижного состава во время испытаний, т;

M_{max} - максимально допустимая масса единицы подвижного состава в соответствии с конструкторской документацией, т.

Для грузовых и пассажирских вагонов тормозной путь поезда S_n (м), определяется с помощью формулы [8]:

$$S_n = t_n \cdot V_0 + S_{DO} \quad (4)$$

где t_n - время подготовки тормозов к действию, с;

V_0 - скорость в начале торможения, км/ч.

Расчетные коэффициенты силы нажатия тормозных колодок в зависимости от тормозного пути определяются по номограммам или таблицам, полученные расчетным путем [3-6]. Следует отметить, что расчетные силы нажатия и трения определены при среднестатистической силе нажатия колодок на колеса для вагонов при осевой нагрузке 23,5 тс [5]. Вместе с тем, тормозные пути грузового поезда по правилам [1] определяются по действительным силам нажатия и действительным коэффициентам трения при осевой нагрузке до 30 тс. Очевидно, использования существующих таблиц и номограмм для определения тормозного коэффициента будет некорректным.

Значение расчетного тормозного коэффициента чугунных колодок δ_{chz} подбирают из уравнения (5) методом итерации или методом половинчатого деления [8].

$$S_{DO} = (1 + \gamma) \cdot \int_0^{V_{act(0)}} \frac{V_{act} \cdot dV}{\delta_{chz} \cdot \varphi_{kp, chz} + \frac{w_{ox}}{1000}} \quad (5)$$

где V_{act} - скорость вагона, км/ч;

$V_{act(0)}$ - начальная скорость торможения, км/ч;

$\varphi_{kp, chz}$ - расчетный коэффициент трения чугунных тормозных колодок;

w_{ox} - основное удельное сопротивление движению единицы железнодорожного подвижного состава при холостом ходе, Н/т.

Значение расчетной силы нажатия чугунных колодок на ось единицы железнодорожного подвижного состава $K_{p, chz}$, кН, определяется по формуле [8]:

$$K_{p, chz} = \frac{\delta_{chz} \cdot M_{max}}{m} \quad (6)$$

где δ_{chz} - расчетный коэффициент силы нажатия чугунных колодок, кН/т:

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

m - количество тормозных осей на единице железнодорожного подвижного состава.

В общем случае задачи исследования тормозных систем подвижного состава состоят в определении таких параметров как:

- изменение давлений в тормозных приборах, в также их временные характеристики при торможении и отпуске;
- фактические силы нажатия колодок на колеса при торможении;
- фактические расчетные тормозные коэффициенты (удельные тормозные силы), реализуемые тормозной системой при торможении в заданном диапазоне скоростей;
- фактические силы трения колодок;
- фактические коэффициенты сцепления колеса и рельса;
- замедление (изменение скорости в единицу времени) вагона при торможении;
- величины тормозных путей вагона в заданном диапазоне скоростей в начале торможения;
- величины тормозных путей одиночного вагона в пересчете на поезд на площадке и нормированных спусках;
- время торможения поезда;
- замедление движения поезда при торможении.

Изложенная методика [8] не в полной мере соответствует современным требованиям, так как большинство из указанных параметров не могут быть определены в процессе экспериментальных исследований, так как их получение связано со значительными техническими трудностями, а также с материальными затратами. Очевидно, в данном случае требуется иная концепция для решения указанной задачи, основанный на применении математических методов обработки и анализа опытных данных, в том числе установлению эмпирических зависимостей, аппроксимации связей между варьируемыми характеристиками, установлению критерии доверительных интервалов. Такие исследования невозможно провести без применения компьютерного моделирования.

Концепция строится на формализации технических задач и применении ЭВМ, что многократно ускоряет типовые, массовые расчеты, повышает точность и сокращает трудоемкость, позволяет проводить многовариантные конструкционные обоснования сложных систем, недоступные при применении «ручной» технологии обработки данных.

Важное значение приобретает автоматизация проведения испытаний, которая позволяет свести к минимуму количество ошибок, вызванных человеческим фактором, повысить точность вычислений и сократить время на проведение испытаний.

Для автоматизации управления процессом ходовых испытаний, вагон-лаборатория оборудуется специальными приборами и устройствами:

- Двумя пневмоцилиндрами, один из которых служит для расцепа автосцепок опытного вагона и вагона-лаборатории, другой – для перекрытия концевого крана тормозной магистрали вагона-лаборатории;
- Электропневмоклапанами, которые служат для управления пневмоцилиндрами;
- Концевыми выключателями;

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

- Датчиком числа оборотов колеса;
- Датчиком давления в тормозной магистрали;
- Усилителями;
- Пультом управления, который имеет табло с контрольными приборами и две кнопки: одна для расцепа автосцепок, другая для возвращения штока пневмоцилиндра в исходное положение (для сцепа автосцепок), на табло имеется две сигнальные лампочки – зеленая и красная, зеленая лампочка загорается при расцепе автосцепок, красная лампочка - при перекрытии концевого крана;
- Аналоговым цифровым преобразователем (АЦП);
- ЭВМ - для записи числа оборотов, скорости, давления в тормозной магистрали и других сигналов, а также их преобразования в необходимый формат для дальнейшей обработки с привлечением программных средств.

Для регистрации и обработки сигналов тормозного процесса используется, разработанный в ГП УкрНИИВ, программный комплекс "DynamicBrake", позволяющей в реальном режиме времени записывать различные по физической природе параметры (рис. 1) [11, 12].

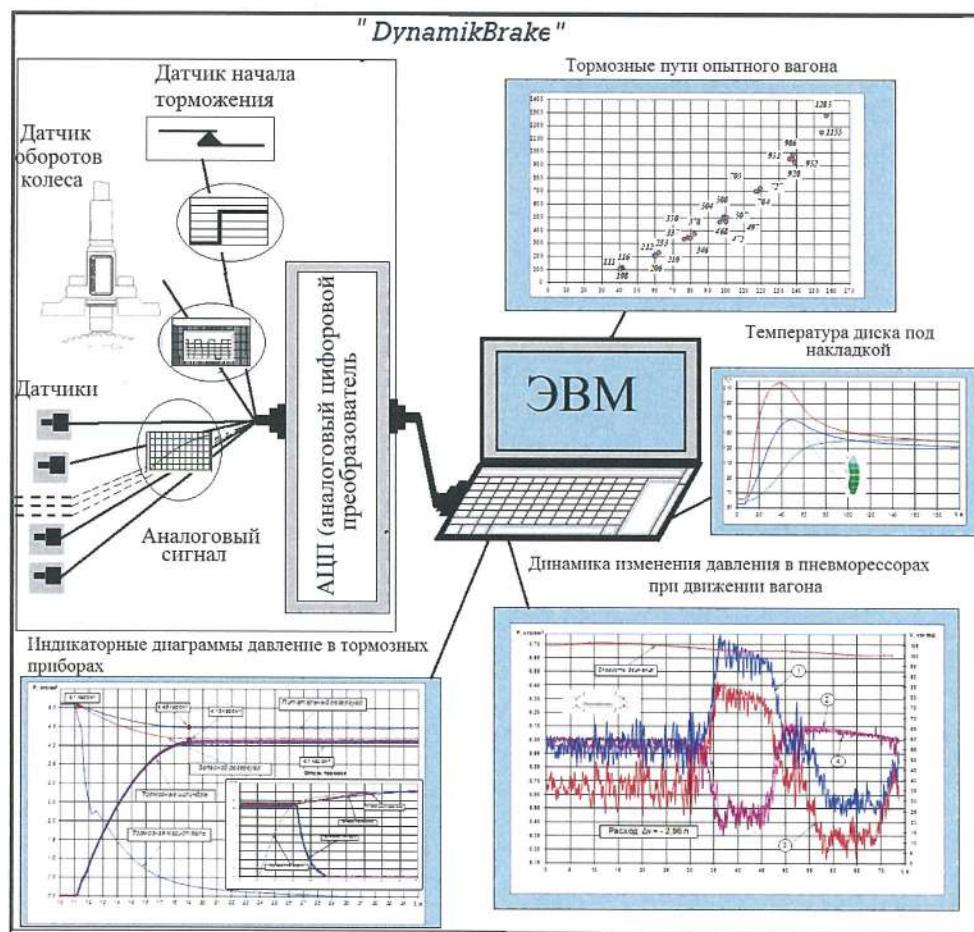


Рис. 1. Многофункциональный аппаратно-программный комплекс

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Опыт показывает, что с увеличением случайных факторов, влияющих на проводимый эксперимент, возрастает расхождения значений, получаемых при измерениях. Это ведет к необходимости повторных измерений. Установление потребного минимального количества измерений имеет большое значение, поскольку дает возможность получения наиболее объективных результатов при минимальных затратах времени и средств. Поэтому в предлагаемой концепции исследования тормозной эффективности единиц подвижного состава железных дорог нашли широкое применение статистические методы [11].

С учетом вышеизложенного и решения поставленных задач, разработана структурная схема исследований тормозной эффективности единиц подвижного состава (табл.1).

Таблица 1. - Структурная схема исследований тормозной эффективности единиц подвижного состава

В основу исследования положены ходовые тормозные испытания грузовых вагонов методом бросания (рис. 2).



Rис. 2. Метод бросания

Исследования проводятся в диапазоне скоростей от 40 км/ч до максимальной с шагом (10-20) км/ч. Для каждой заданной скорости выполняется не менее трех торможений. По измеренному массиву значений тормозных путей определяются коэффициенты уравнения линии тренда.

Накопленный опыт ходовых тормозных испытаний единиц подвижного состава железных дорог свидетельствует, что модель тормозного пути может быть представлена полиноминальной зависимостью второй степени от скорости в начале торможения [11]:

$$S = \sum_{k=1}^m a_k \cdot V^2 , \quad (7)$$

где S - тормозной путь;

V - скорость в начале торможения;

m - порядок (число членов) степенного ряда;

a_k - коэффициенты ряда определяются по формулам;

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Продовження таб. 1

Коэффициенты линии тренда измеренных тормозных путей определяются статистическим методом максимального правдоподобия [13, 14].

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i V_i \sum_{i=1}^n V_i^4 - \sum_{i=1}^n S_i V_i^2 \sum_{i=1}^n V_i^3}{\sum_{i=1}^n V_i^4 \sum_{i=1}^n V_i^2 - (\sum_{i=1}^n V_i^3)^2}; \quad a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i V_i^2 \sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n S_i V_i \sum_{i=1}^n V_i^3}{\sum_{i=1}^n V_i^4 \sum_{i=1}^n V_i^2 - (\sum_{i=1}^n V_i^3)^2}, \quad (8)$$

где V_i и S_i - скорости в начале торможения и соответствующие им тормозные пути, полученные в результате тормозных испытаний.

Коэффициент детерминации R^2 , определяется по формуле [14]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - (a_2 \cdot V_i^2 + a_1 \cdot V_i))^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n S_i)^2}{n}} \quad (9)$$

Если коэффициент детерминации меньше 0,95, то торможения опытного поезда продолжаются до тех пор, пока его величина не превысит 0,95.

Для определения тормозного коэффициента используется математическая степенная зависимость между тормозным коэффициентом и величиной тормозного пути:

$$\text{действительный тормозной коэффициент} - \delta(V_0)_d = c \cdot S(V_0)^d; \quad (10)$$

$$\text{тормозной путь} - S(V_0) = c \cdot \delta_d(V_0)^d. \quad (11)$$

где c и d – коэффициенты, определяемые статистическим методом;

V_0 – скорость в начале торможения, км/ч.

Для каждой фиксированной скорости в начале торможения и заданного диапазона действительных коэффициентов силы нажатия колодок и соответствующих им тормозных путей формируется массив значений, представленный в таблице 2.

Таблица 2. - Массив значений тормозных путей

V, км/ч	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48
	Действительные коэффициенты силы нажатия колодок кН/т														
Тормозные пути вагонами															
40	217	215	213	210	208	206	204	202	201	199	197	195	194	192	191
50	330	326	323	319	316	313	310	307	304	301	298	296	293	290	288
60	468	463	458	453	448	443	439	434	430	426	422	418	414	410	407
70	632	625	618	611	604	598	592	586	580	574	568	563	558	552	547
80	823	813	804	795	786	777	769	761	753	746	738	731	724	717	710
90	1040	1028	1016	1004	993	982	971	961	951	941	932	922	913	905	896
100	1284	1269	1254	1239	1225	1212	1198	1186	1173	1161	1149	1138	1126	1115	1105
110	1555	1536	1518	1500	1483	1467	1450	1435	1420	1405	1390	1376	1363	1349	1336
120	1852	1830	1808	1787	1767	1747	1727	1709	1690	1673	1655	1639	1622	1606	1591

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Продовження таб.1

Определение массива значений в таблице 1 выполняется на основе реализации имитационной модели в виде дифференциального уравнения движения вагона при торможении как единой массы [5, 6, 11]:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \left\{ 1000 \cdot \delta_\sigma (p_y = p_{y,nom}) \cdot \varphi(V)_{mp,\sigma} \cdot \beta(K_i / K_{max}, t) + w_{ox}(V) + i_c \right\} \quad (12)$$

где ζ - замедление поезда при действии удельной замедляющей силы;
 δ_σ - действительный коэффициент силы нажатия тормозных колодок при максимальном давлении в тормозном цилиндре;
 $\varphi_{mp,\sigma}(V)$ - действительный коэффициент трения;
 $\beta(K_i/K_{max}, t)$ - функция нарастания действительной силы нажатия тормозных колодок (накладок) на колеса (диски) в процессе торможения вагона, определяется при стационарных испытаниях (рис. 3);
 i_c - величина уклона рельсового пути, %;
 w_{ox} - основное удельное сопротивление движению поезда.

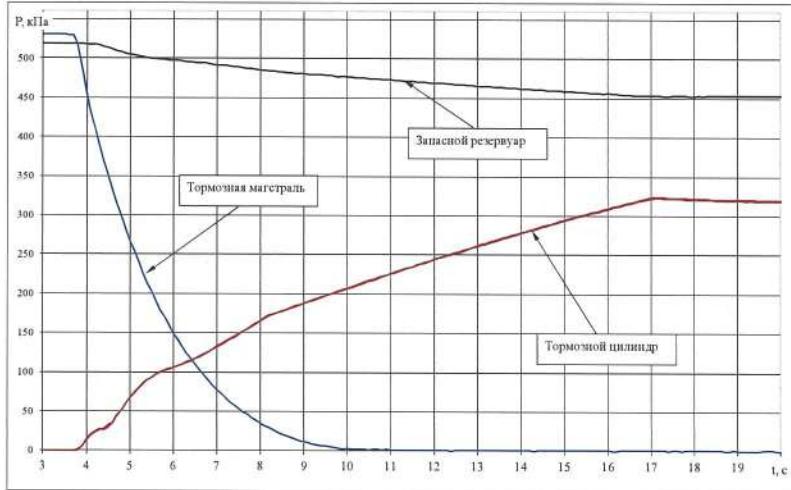


Рис. 3. Диаграмма изменения давления в тормозных приборах вагона

Дифференциальное уравнение (12) представляет обыкновенное дифференциальное уравнение и относится к классу задач Коши. Для решения дифференциального уравнения (12) используется метод Рунге-Кутты IV порядка [15, 16].

Коэффициенты c и d определяются статистическим методом с использованием массива данных таблицы 1 по формулам [11, 14]:

$$c(V_0) = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(\delta_i) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(S_i))^2 - \sum_{i=1}^n \ln(S_i) \cdot \ln(\delta_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(S_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(S_i)^2 - \sum_{i=1}^n (\ln(S_i))^2} \right) \quad (13)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Продовження таб. 1

$$d(V_0) = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(S_i) \cdot \ln(\delta_i) - \sum_{i=1}^n \ln(S_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(\delta_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(S_i)^2 - \sum_{i=1}^n (\ln(S_i))^2} \quad (14)$$

Фактический действительный коэффициент силы нажатия тормозных колодок по результатам испытаний для заданной скорости V_0 определится по формуле:

$$\delta_{\phi}(V_0) = c(V_0) \cdot (a_1 \cdot V_0 + a_2 \cdot V_0^2)^{d(V_0)}, \quad (15)$$

где a_1 и a_2 - коэффициенты уравнения линии тренда.

Формула (15) может быть представлена в упрощенном виде:

$$\delta_{\phi}(V_0) = \ln(c(V_0)) + d(V_0) \cdot \ln((a_1 \cdot V_0 + a_2 \cdot V_0^2)) \quad (16)$$

Полученные значения фактических действительных коэффициентов силы нажатия колодок на колеса корректируются на максимальную загрузку вагона и минимальное давление в тормозных цилиндрах (3):

$$\delta_{\mathcal{D}}(V_0) = \delta_{\phi}(V_0) \cdot \frac{P_{\min}}{P_0} \cdot \frac{M_0}{M_{\max}}, \quad (17)$$

где P_{\min} – минимальное давление в тормозном цилиндре, установленное технической документацией;

P_0 – давление реализуемое в тормозном цилиндре при торможении;

M_0 – фактическая масса вагона;

M_{\max} – максимальная масса вагона, установленная технической документацией.

Расчет тормозного пути грузового поезда выполняется по действительным коэффициентам (17) с учетом нарастания силы нажатия колодок вдоль поезда (рис. 3).



Рис. 3. Процесс распространения тормозной волны грузового поезда

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Продовження таб. 1

Тормозная волна - процесс распространения понижения давления воздуха в ТМ при торможении от головы к хвосту поезда.

Скорость распространения тормозной волны представляет отношение длины тормозной магистрали поезда на время распространения тормозной волны. По международным требованиям скорость распространения тормозной волны должна быть не менее 250 м/с, в новейших тормозах она достигает 300 м/с.

Время нарастания тормозной силы в каждом вагоне будет происходить с запаздыванием обусловленным временем распространения тормозной волны до середины вагона.

Для однотипных вагонов время (t_i) распространения тормозной волны до середины i -го вагона определяется по формуле [11, 17]:

$$t_i = \frac{(2 \cdot i - 1) \cdot L_{\delta,i}}{2 \cdot V_{mb}}, \quad (18)$$

где $L_{\delta,i}$ - база i -го вагона по осям сцепления автосцепок;

i - порядковый номер вагона в составе поезда;

V_{mb} - скорость распространения тормозной волны.

Динамика нарастания тормозной силы для поезда, с учетом скорости распространения тормозной волны, определяется по формуле [11, 17]:

$$F_{noezd}(\delta(t)) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \beta \left(K_i / K_{nom}, \left(t - \frac{(2 \cdot i - 1) \cdot L_{\delta,i}}{2 \cdot V_{mb}} \right) \right) \cdot \delta_{i,\text{експ}}, \quad (18)$$

В качестве примера на рис. 4 приведены диаграммы нарастания тормозной силы для одиночного вагона и грузового поезда.



Рис. 4. Диаграммы нарастания тормозной силы

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Закінчення таб. 1

Тормозные пути грузового поезда определяются путем решения дифференциального уравнения (12) с учетом нарастания тормозной силы для грузового поезда, действительных коэффициентов силы нажатия колодок на колеса и количества вагонов в составе поезда.

Погрешность определения тормозных коэффициентов определяется путем сравнения тормозных путей по уравнению линии тренда и полученных на основании решения дифференциального уравнения (12) по экспериментальным значениям тормозных коэффициентов.

Расчетные коэффициенты чугунных колодок определяются по аналогичной методике с учетом тормозных путей, полученных для композиционных колодок.

Для исследования тормозной эффективности грузовых поездов по вышеизложенному алгоритму и с учетом требований [1], был разработан пакет прикладных программ для ЭВМ "TestBrake", написанных на языке VBA (Visual Basic for Application). Результаты исследования выводятся в виде таблиц EXCEL.

В качестве примера, исследованиям тормозной эффективности подвергалась вагон-цистерна модели 15-7140 (рис. 5) в груженом и порожнем состояниях.



Рис.5. Вагон-цистерна модели 15-7140

Вагон-цистерна предназначена для перевозки растительных масел по всей сети железных дорог колеи 1520 мм. Тормоз – автоматический пневматический с раздельным торможением тележек. Конструкционная скорость 120 км/ч.

Масса тары, не более 26,7 т.

Исследования тормозной эффективности вагона в груженом состоянии

Фактическая масса груженого вагона (вес груза с тарой) составляла 908,21 кН (92,58 тс), среднее давление в тормозных цилиндрах при торможении - 330 кПа.

Измеренные значения тормозных путей, полученные при ходовых испытаниях методом бросания (см. рис. 2) представлены на рис. 6.

Исходные данные программы "TestBrake" представлены на рис. 7.

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

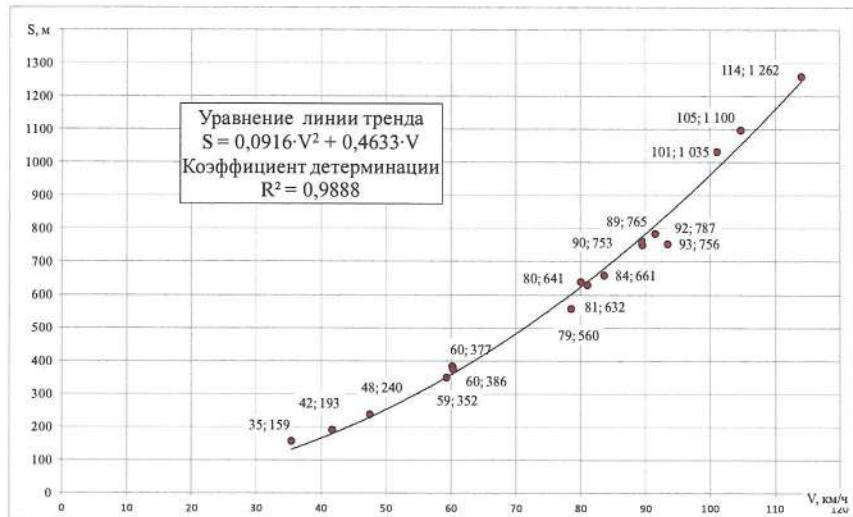


Рис. 6. Массив измеренных значений тормозных путей [18]

Входные данные для исследования

Наименование	Обозначение	Величина
модель вагона		15-7140
Нормированное минимальное давление , кгс / см ²	pdavo	3
Осевая нагрузка, тс	qo	23,5
Фактическая масса вагона, т	mfact	92,58
Фактическое давление в цилиндре, кгс/см ²	pdav	3,3
Масса тары, т	mtara	25,28
Начальное время, с	t01	0
Начальная скорость, км/ч	vп	40
Конечная скорость, км/ч	vk	120
Шаг интервала времени торможения, с	shag	0,1
Шаг интервала скорости, км/ч	shag1	10
Начальное значение тормозного коэффициента, кН	ud1	1,6
Шаг интервала тормозного коэффициента, кН	udsh	0,03
Число интервалов тормозного коэффициента	udk	50
Уклон пути, %	ii	0
Количество тормозных колодок на вагоне, шт	kolvo	8
Длина вагона по осям сцепления, м	lb	12,02
Скорость распространения тормозной волны, м/с	skortv	250
Количество вагонов в составе поезда, шт	kolv	70
нормированный уклон, %	ii1	-6
нормированный уклон, %	ii2	-10
Тип вагона	tip	2

Причесание: Значение tip соответствует типам вагонов:
 для tip = 1 - четырехосные полувагоны, крытые вагоны, платформы, думпкары,
 для tip = 2 - четырехосные цистерны, хопперы

Кнопка запуска программы для определения характеристик тормозного процесса

Измеренные значения тормозных путей опытного вагона	
грузеный	вагон
скорость, км/ч	путь, м
a	b
0,091644384	0,463255137
83,60	661,00
93,40	756,00
78,50	560,00
89,50	753,00
59,30	352,00
89,40	765,00
81,00	632,00
91,50	787,00
60,20	386,00
104,70	1100,00
60,30	377,00
80,00	641,00
101,00	1035,00
35,40	159,00
114,10	1262,00

грузеный вагон	
относительный коэффицієнт	
0	0
1	0,05
2	0,1
3	0,15
4	0,2
5	0,25
6	0,3
7	0,35
8	0,4
9	0,45
10	0,5
11	0,55
12	0,6
13	0,65
14	0,7
15	0,75
16	0,8
17	0,85
18	0,9
19	0,95

Рис. 7. Данные для определения характеристик тормозного процесса грузового поезда в груженом состоянии

С целью повышения точности, выбор начального значения и шага для действительного тормозного коэффициента является выполнение условия попадания измеренных тормозных путей в середину номограмм тормозных путей. Для контроля предусмотрен вывод номограмм на лист EXCEL (рис. 8) под названием «номограммы». Корректируется номограмма путем задания начального значения действительного коэффициента и величины интервала.

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

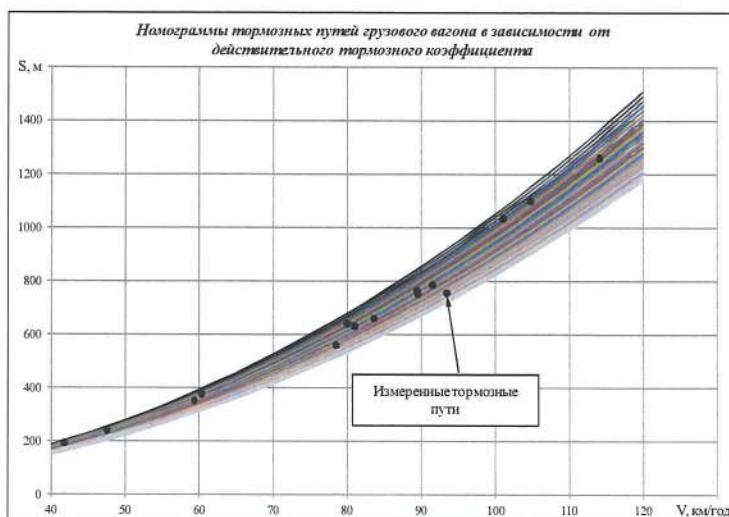


Рис. 8. Номограммы тормозных путей вагона

Результаты исследования приведены на рис.9.

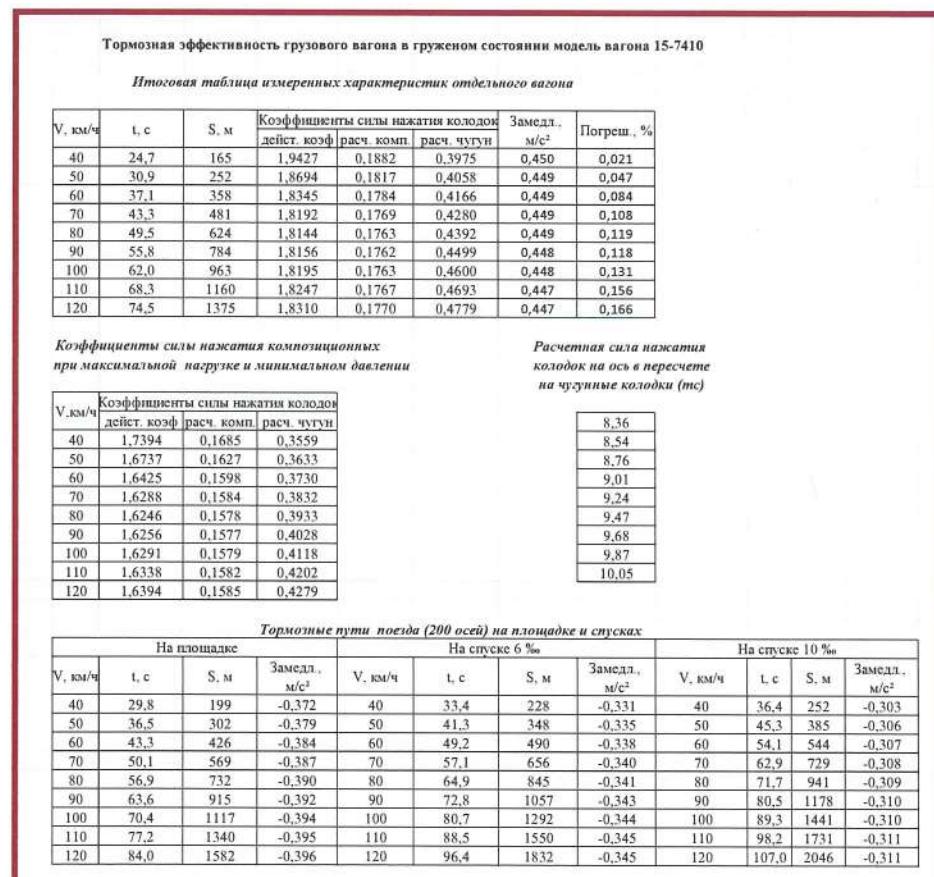


Рис. 9. Результаты исследования тормозной эффективности груженого поезда

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Закінчення рис. 9

Справнільна таблиця результатов дослідження з вимогами ГОСТ 34434-2018

V, км/ч	до 90 км/ч включ.			св. 90 км/ч до 100 км/ч включ.			св. 100 км/ч до 120 км/ч включ.		
	ГОСТ	Исслед.	+/-	ГОСТ	Исслед.	+/-	ГОСТ	Исслед.	+/-
S, м	1060	915	+	1040	1117	-	1200	1582	-
δр	0,14	0,1577	+	0,18	0,1579	-	0,25	0,1585	-
Сила на ось, тс чугунних колодок	8	9,87	+	10,5	10,30	-	14,5	10,69	-

Допустимые значения тормозных путей на нормированных спусках [20]

V, км/ч	Спуск 6 %		
	A	B	эксперим
80	800	1000	1057
90	1100	1300	1292
100	1200	1400	1550
Спуск 10 %			
80	1000	1200	1178
90	1300	1500	1441

Исследования тормозной эффективности вагона в порожнем состоянии

Фактическая масса порожнего (тара) вагона - 253,1 кН (25,8 тс), среднее давление в тормозных цилиндрах при торможении - 140 кПа.

Измеренные значения тормозных путей приведены на рис.10.

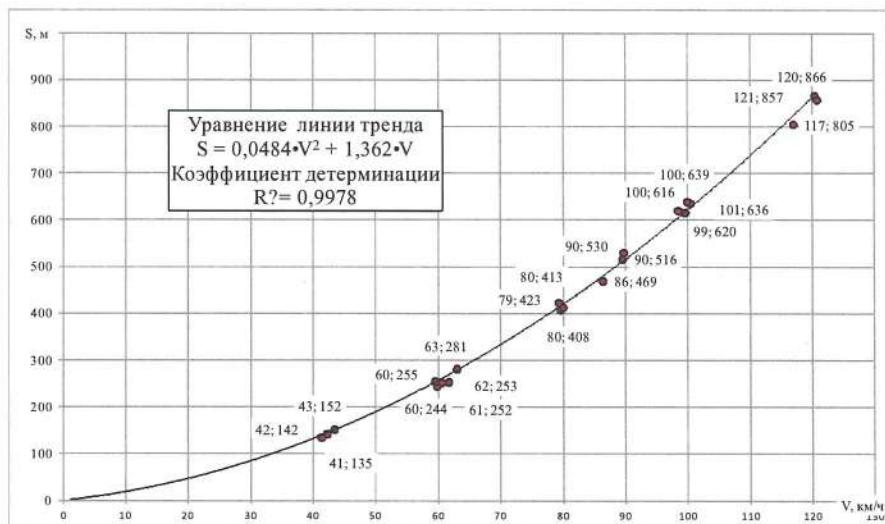


Рис. 10. Массив значений измеренных тормозных путей [18]

Массив входных данных для исследования тормозной эффективности вагона в порожнем состоянии приведен на рис. 11.

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Входные данные для исследования		
Наименование	Обозначение	Величина
модель вагона		15-7140
Нормированное максимальное давление , кгс / см ²	pdavo	1,6
Нормированное минимальное давление , кгс / см ²	pdavo	1,2
Осьевая нагрузка, тс	qo	6,32
Фактическая масса вагона, т	mfact	25,28
Фактическое давление в цилиндре, кгс/см ²	pdav	1,4
Масса тары, т	mtara	25,28
Начальное время, с	t01	0
Начальная скорость, км/ч	vn	40
Конечная скорость, км/ч	vk	120
Шаг интервала времени торможения, с	shag	0,1
Шаг интервала скорости, км/ч	shag1	10
Начальное значение тормозного коэффициента	ud1	2
Шаг интервала тормозного коэффициента	udsh	0,03
Число интервалов тормозного коэффициента	udk	40
Уклон пути, %	ii	0
Количество тормозных колодок на вагоне, шт	kolvo	8
Длина вагона по осям сцепления, м	lb	12,02
Скорость распространения тормозной волны, м/с	skortv	250
Количество вагонов в составе поезда, шт	kolv	50
нормированный уклон, %	ii1	-6
нормированный уклон, %	ii2	-10
Тип вагона	ttip	2

Причесание: Значение ttip соответствует типам вагонов:
для ttip = 1 - четырехосные полувагоны, крытые вагоны, платформы, думпкары
для ttip = 2 - четырехосные цистерны, хопперы

Кнопка запуска программы для определения характеристик тормозного процесса

Измеренные значения тормозных путей опытного вагона	
порожний	путь, м
скорость, км/ч	
коэффициенты линии тренда	
a	
b	
0,048419069	1,362553239
63,00	281,00
86,40	469,00
79,60	408,00
100,50	636,00
43,40	152,00
120,40	866,00
42,20	142,00
120,80	857,00
41,30	135,00
99,90	639,00
59,80	244,00
79,30	423,00
80,00	413,00
98,50	620,00
59,50	255,00
89,70	530,00

порожний вагон	относительный коэффициент
0	0
1	0,05
2	0,1
3	0,15
4	0,2
5	0,25
6	0,3
7	0,35
8	0,4
9	0,45
10	0,5
11	0,55
12	0,6
13	0,65
14	0,7
15	0,75
16	0,8
17	0,85
18	0,9
19	0,95
20	1

Рис. 11. Данные для определения характеристик тормозного процесса грузового поезда в порожнем состоянии

Результаты исследования приведены на рис. 12.

Тормозная эффективность грузового вагона в порожнем состоянии модель вагона 15-7410						
Итоговая таблица измеренных характеристик отдельного вагона						
V, км/ч	t, с	S, м	Коэффициенты силы нажатия колодок действ. коэф расч. компл. расч. чугун	Замедл., м/с ²	Погреш., %	
40	21,5	132	1,6202	0,1952	0,4053	0,5168 1,539
50	24,6	189	1,7897	0,2108	0,4628	0,5646 0,790
60	27,8	256	1,9226	0,2231	0,5127	0,5995 0,421
70	31,1	333	2,0314	0,2333	0,5566	0,6252 0,199
80	34,4	419	2,1216	0,2417	0,5958	0,6460 0,084
90	37,7	515	2,1974	0,2489	0,6310	0,6631 0,023
100	41,0	620	2,2624	0,2550	0,6628	0,6775 0,027
110	44,3	736	2,3174	0,2601	0,6918	0,6897 0,051
120	47,7	861	2,3642	0,2646	0,7181	0,6988 0,061

Проверка на юз

V, км/ч	Ψ	Ψисл
40	1,1154	0,6192
50	1,0624	0,6570
60	1,0208	0,6820
70	0,9873	0,6992
80	0,9597	0,7112
90	0,9366	0,7196
100	0,9169	0,7255
110	0,9000	0,7293
120	0,8853	0,7314

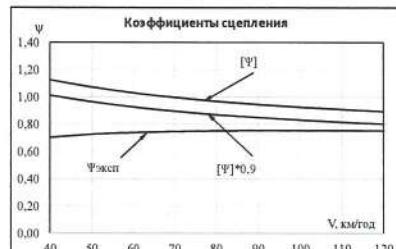
Расчетная сила нажатия колодок на ось в пересчете на чугунные колодки (тс)		
V, км/ч	2,241	
40	2,559	
50	2,835	
60	3,077	
70	3,294	
80	3,489	
90	3,664	
100	3,825	
110	3,970	
120		

Рис. 12. Результаты исследования тормозной эффективности грузового поезда в порожнем состоянии

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Закінчення рис. 12

Тормозные пути поезда (200 осей) на площадке			
На площадке			
V, км/ч	t, с	S, м	Замедл., м/с ²
40	26,7	172	-0,414
50	30,3	242	-0,456
60	34,0	323	-0,489
70	37,6	416	-0,515
80	41,4	519	-0,536
90	45,1	633	-0,553
100	48,8	757	-0,567
110	52,6	892	-0,580
120	56,4	1038	-0,590



Сравнительная таблица результатов исследования с требованиями ГОСТ 34434-2018

V, км/ч	до 90 км/ч включ.			св. 90 км/ч до 100 км/ч включ.			св. 100 км/ч до 120 км/ч включ.		
	ГОСТ	Исслед.	+/-	ГОСТ	Исслед.	+/-	ГОСТ	Исслед.	+/-
S, м	720	633	+	890	757	+	1200	1038	+
δр	0,22	0,213	-	0,22	0,219	-	0,25	0,227	-
Сила на ось, тс чугунных колодок	3,5	3,572	+	3,5	3,738	+	4,5	4,015	-

Для сравнительного анализа результатов исследования были выполнены расчеты грузового поезда в диапазоне скоростей (90-120) км/ч по методике ГОСТ 34434-2018 [1]. Пример результатов расчета для скорости 120 км/ч приведен на рис. 13.

Исходные данные		Тормозной расчет по ГОСТ 34434-2018		
		Результаты расчета		
Модель вагона	15-7410	Вычисленные по новым правилам	Композиционные	
интервальный шаг времени торможения	1	Порожний	Груженый	
Начальная скорость для груженого поезда, км/ч	120	Усилие сжатия отпускной пружины тт, кН	1,033	1,033
Начальная скорость для порожнего поезда, км/ч	120	Усилие пружины авторегулятора, кН	0,513	0,513
Параметры вагона		Действительная сила нажатия на колодку, кН	6,153	18,614
Масса тары вагона, т	25,8	Расчетная сила нажатия на колодку, кН	6,879	18,024
Масса груза, т	68,2	Расчетный тормозной коэффициент, тс/т	0,217	0,156
Число тормозных колодок на вагоне	8	Действительный тормозной коэффициент, кН/т	1,908	1,584
Число тормозных колодок колесной паре	2	Приведенный тормозной коэффициент, тс/т	0,194	0,161
Число тормозных цилиндров	2	Осьева нагрузка, тс	6,45	23,50
Параметры тормозного цилиндра		Гальмівна ефективність		
Диаметр поршня, м	0,254	Скорость в начале торможения, км/ч	120	120
Жесткость пружины, кН/м	2,300	Тормозной путь, м	1182,9	1604,2
Усилие предварительного сжатия пружины, кН	0,883	Расчетный коэффициент чугунных колодок	0,592	0,430
КПД тормозного цилиндра	0,980	Тормозной путь при чугунных колодках, м	1183,1	1603,9
Композиционные колодки		Сила нажатия композиционных колодок на ось в в пересчете на чугунные	3,82	10,12
давление в тормозном цилиндре, кПа	300	Для справки		
груженый		Тормозной путь груженого поезда при расчетном коэффициенте 0,157	1623,9	
порожний	120			
Передаточное отношение рычажной передачи	5,870			
Выход штока тормозного цилиндра, м	0,065			
груженый				
порожний	0,065			

Рис. 13. Результаты расчет вагона цистерни модели 15-7410

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Закінчення рис. 13

Параметри авторегулятора	
Усилие предварительного сжатия, кН	0,883
Жесткость пружины, кН/м	20,8
Величина сжатия при торможении, м	0,010
Передаточное отношение (композиционные колодки)	0,470
Передаточное отношение (чугунные колодки)	0,560
КПД рычажной передачи	0,950

Кнопка пересчета на чугунные колодки в груженом состоянии поезда
Кнопка пересчета на чугунные колодки в порожнем состоянии поезда

Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных исследований показали, что наилучшая сходимость приходится на груженый режим торможения грузового поезда (табл. 2).

Таблица 2. - Характеристики тормозного процесса, полученные экспериментальными и расчетными исследованиями

V, км/ч	Груженый режим			Порожний режим		
	1	2	3	4	5	6
Тормозные пути грузового поезда, м						
V, км/ч	$S_{\text{эксп}}$	$S_{\text{расч}}$	$\Delta, \%$	$S_{\text{эксп}}$	$S_{\text{расч}}$	$\Delta, \%$
90	922	917	0,54%	633	703	11,15%
100	1128	1120	0,70%	757	850	12,26%
110	1355	1342	0,95%	892	1010	13,17%
120	1604	1585	1,20%	1038	1183	13,92%
Расчетные тормозные коэффициенты композиционных колодок						
V, км/ч	$\delta_{p,\text{эксп}}$	$\delta_{p,\text{расч}}$	$\Delta, \%$	$\delta_{p,\text{эксп}}$	$\delta_{p,\text{расч}}$	$\Delta, \%$
Конец таблицы 2						
1	2	3	4	5	6	7
90	0,1577	0,1564	0,87%	0,2133	0,2174	1,94%
100	0,1579	0,1564	0,97%	0,2185	0,2174	0,50%
110	0,1582	0,1564	1,14%	0,2230	0,2174	2,48%
120	0,1585	0,1564	1,36%	0,2268	0,2174	4,11%
Расчетные тормозные коэффициенты чугунных колодок						
V, км/ч	$\delta_{\text{ч,эксп}}$	$\delta_{\text{ч,расч}}$	$\Delta, \%$	$\delta_{\text{ч,эксп}}$	$\delta_{\text{ч,расч}}$	$\Delta, \%$
90	0,4028	0,4305	6,86%	0,5409	0,5922	9,49%
100	0,4118	0,4305	4,53%	0,5681	0,5922	4,24%
110	0,4202	0,4305	2,45%	0,5930	0,5922	0,14%
120	0,4279	0,4305	0,62%	0,6155	0,5922	3,78%
Сила нажатия композиционных колодок на ось в пересчете на чугунные, тс						
V, км/ч	$K_{\text{ч,эксп}}$	$K_{\text{ч,расч}}$	$\Delta, \%$	$K_{\text{ч,эксп}}$	$K_{\text{ч,расч}}$	$\Delta, \%$
90	9,47	9,97	5,32%	3,49	3,77	8,07%
100	9,68	9,82	1,47%	3,66	3,70	0,97%
110	9,87	9,63	2,48%	3,82	3,63	5,09%
120	10,05	10,12	0,65%	3,97	3,82	3,78%

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

Аналіз показал удовлетворительне совпадення результатов експериментальних и расчетных исследований (табл. 3):

Таблиця 3. - Сопоставлення результатов експериментальних и расчетных исследований

Наименование параметра	Груженый поезд	Порожний поезд
Тормозные пути грузового поезда, м	0,54 % - 1,2 %	11,15 % - 13,92 %
Расчетные тормозные коэффициенты композиционных колодок	0,87 % - 1,36 %	0,5 % - 4,11 %
Расчетные тормозные коэффициенты чугунных колодок	0,62 % - 6,86 %	0,14 % - 9,49 %
Сила нажатия композиционных колодок на ось в пересчете на чугунные, тс	0,65 % - 5,32 %	3,78 % - 8,07 %

Наибольшие расхождения тормозных характеристик для порожнего поезда, может быть обусловлено тем, что при расчете тормозного пути порожнего поезда использовалось нарастание тормозной силы аналогично груженому поезду.

Расчетные коэффициенты силы нажатия композиционных колодок, полученные при стационарных испытаниях, пересчитывались на минимальные давления в тормозных цилиндрах [19] по формулам:

$$\text{для груженого вагона } \delta_{p,\min} = \delta_{p,\text{стац}} \cdot P_{\min}/P_{\text{стац}} = 169 \cdot 300/330 = 0,154 \quad (19)$$

$$\text{для порожнегого вагона } \delta_{p,\min} = \delta_{p,\text{стац}} \cdot P_{\min}/P_{\text{стац}} = 0,28 \cdot 120/150 = 0,224,$$

Различие значений расчетных коэффициентов композиционных колодок с результатами стационарных и ходовых тормозных испытаний не превысило 3 % для груженого поезда и 5 % для порожнегого (табл. 4).

Таблиця 4. - Сопоставимий аналіз расчетных тормозных коэффициентов композиционных колодок

V, км/ч	Груженый режим			Порожний режим		
	V, км/ч	$\delta_{p,\text{эксп}}$	$\delta_{p,\text{стац}}$	$\Delta, \%$	$\delta_{p,\text{эксп}}$	$\delta_{p,\text{стац}}$
90	0,1577	0,154	2,35%	0,2133	0,2240	5,01%
100	0,1579	0,154	2,47%	0,2185	0,2240	2,50%
110	0,1582	0,154	2,65%	0,2230	0,2240	0,46%
120	0,1585	0,154	2,84%	0,2268	0,2240	1,22%

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

ВЫВОДЫ

1 Тормозная эффективность вагона цистерны модели 15-7410 соответствует требованиям «Нормам...» [2] для максимальной скорости 120 км/ч (табл. 5);

Таблица 5. - Критерии тормозной эффективности

Тормозные коэффициенты силы нажатия			
Режимы воздухораспределителя по загрузке вагона	Величина $[\delta_p]$	Величина δ_p	Сравнение
Средний	0,14	0,1585	$\delta_p > [\delta_p]$
Порожний	0,22	0,2268	$\delta_p > [\delta_p]$
Сила нажатия композиционных колодок на ось в пересчете на чугунные			
Режимы воздухораспределителя по загрузке вагона	Величина $[K_u]$	Величина K_u	Сравнение
Средний	7,0	10,05	$K_u > [K_u]$
Порожний	3,5	3,97	$K_u > [K_u]$

2 Тормозная эффективность вагона цистерны модели 15-7410 соответствует требованиям ГОСТ 34434-2018 [1] только для скорости 90 км/ч в груженом состоянии;

3 Для порожнего вагона при скорости 90 км/ч расчетный тормозной коэффициент меньше допустимого значения на 3,14 %, при скорости 100 км/ч меньше на 2,5 %, при скорости 120 км/ч меньше на 1,22 %;

4 Для порожнего вагона требуется увеличение минимального давления в тормозных цилиндрах с 120 кПа до 130 кПа.

5 Представленная концепция значительно расширяет количество параметров тормозного процесса, используемых для анализа тормозной эффективности грузовых поездов по результатам экспериментальных тормозных исследований:

6 Сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований свидетельствует об их достаточно удовлетворительном совпадении.

7 Программный комплекс позволяет повысить автоматизацию проведения испытаний, точность вычислений, сократить время на проведение испытаний, а также свести к минимуму количество ошибок, вызванных человеческим фактором;

8 Изложенная концепция оценки тормозной эффективности вагонов может найти широкое применение для тормозных систем подвижного состава различного назначения, при этом повысить точность обработки данных и увеличить перечень определяемых показателей, для обеспечения выполнения требований безопасности на вновь проектируемом подвижном составе.

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 34434-2018. Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета. [Действует с 30.10.2018]. Москва: Стандартинформ, 2018. 27 с. (Межгосударственные стандарты).
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 260 с.
3. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України. Київ: Транспорт України, 2002. 143 с.
4. В.Г. Иноземцев, П.Т.Гребенюк. Нормы и методы расчета автотормозов. Москва: «Транспорт», 1971. 57 с.
5. Гребенюк П., Долганов А., Скворцова А. Тяговые расчеты. М. «Транспорт», 1987. 272 с.
6. Гребенюк П. Правила тормозных расчетов. М. «Интекст», 2004. 112 с.
7. ЦВ-ЦЛ-0013. Інструкція з ремонту гальмівного обладнання вагонів. Київ: Транспорт України, 2005. 160 с.
8. ГОСТ 33597-2015. Тормозные системы железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний. [Действует с 27.10.2015]. Москва: Стандартинформ, 2016. 28с. (Межгосударственный стандарт).
9. Водянников Ю.Я., Василенко В.С., Ольгард Л.С. Методология проведения поездных тормозных испытаний для определения тормозной эффективности единиц подвижного состава. // «Вагонный парк». 2014. № 02 (83). С.9-13.
10. Водянников Ю.Я., Сафонов А.М., Жихарцев К.Л. Методика экспериментального исследования тормозной эффективности и тормозных характеристик единиц подвижного. // Вагонный парк. 2008, № 3, С. 14-17.
11. Сафонов А. М., Водянников Ю.Я., Макеева Е.Г. Тормозная эффективность грузовых вагонов. Методология расчетных и экспериментальных исследований с использованием математических моделей и компьютерного моделирования: монография. Кременчук: УкрНИИВ, 2018. 173 с.
12. Водянников Ю. Я., Василенко В.С. Программный комплекс для экспериментального исследования тормозных систем единиц подвижного состава железных дорог// «Рейковий рухомий склад». Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ», 2013. Вип. 9. С. 38-47.
13. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
14. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. Изд. 2, перераб. 1970. 432 с.
15. Ибрагимов Н.Х. Практический курс дифференциальных уравнений и математического моделирования. Классические и новые методы. Нелинейные математические модели. Симметрия и принцип инвариантности. Превод с англ. И. С. Емельяновой. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского, 2007. 421 с.
16. Колченова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. М.: Изд-во «Наука», 1972. 367 с.
17. Водянников Ю. Я., Свистун С.М., Макеева Е.Г. Методология пересчета тормозной эффективности одиночного вагона на тормозную эффективность поезда. // «Залізничний транспорт». 2014. № 2. С. 27-37.
18. Протокол № 0033-2020 від 24 липня 2020 р. Попередніх випробувань вагона-цистерни моделі 15-7140 (поїзні гальмівні випробування). Кременчук: ДП «УкрНІВ», 2020. 18 с.
19. Протокол № 0029-2020 від 30 червня 2020 р. попередніх випробувань вагона-цистерни моделі 15-7140 (станціонарні гальмівні випробування). Кременчук: ДП «УкрНІВ», 2020. 21 с.
20. ЦШ-0001. Інструкція з сигналізації на залізницях України.К.: Інпрес, 2008. 159 с.

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

O M. Safronov

State Enterprise "Ukrainian Research Railway Car Bulding Institute "

33 I. Prikhodka Str, Kremenchuk, Poltava region, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-03-24

AN APPROACH TO EVALUATION OF FREIGHT TRAINS BRAKING EFFICIENCY BY THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES IN COMPLIANCE WITH HOST 34434-2018 REQUIREMENTS

The approach of experimental study of the freight trains braking efficiency using computer simulation based on the implementation of the simulation model in the form of a differential equation of the wagon motion during braking, is proposed. The methodology of experimental studies is based on universal formulas for power-law dependences of braking parameters.

The braking efficiency is evaluated by the use of computer software packages written in VBA (Visual Basic for Application) in Excel. The software package allows you to increase the automation of testing, the accuracy of calculations, to reduce the time for testing, and also minimize the number of errors caused by the human factor.

The presented methodology significantly extends the number of parameters of the braking process used to analyze the braking efficiency of a freight train based on the results of running braking tests: actual values of braking coefficients; braking distances of a freight train not only on the site, but also on normalized gradient descents for a given number of wagons in the train, taking into account the increase in the braking force along the wagons in the train formation; actual values of wheel and rail adhesion coefficients during braking; the deceleration of the freight wagon and the train during braking, as well as the braking time.

Examples of computational and experimental studies of a freight train with tread brake are given. A comparative analysis of experimental and computational studies demonstrates sufficiently satisfactory matching of their results.

Key words: freight train, braking distance, braking speed, braking coefficient, increase in braking force, mathematical model, trend line, braking wave.

REFERENCES

1. Tormoznyie sistemy hruzovykh zhielieznodorozhnykh vahonov. Tiekhnicheskiie tribovaniia i pravila raschieta [Brake systems of freight railway cars. Technical requirements and calculation rules]. (2018). HOST 34434-2018. Moscow: Standardinform, p.32 [in Russian]
2. Normy dlia raschieta i proektirovaniia vahonov zhielieznikh doroh MPS kolei 1520 mm [norms for calculating and designing railway cars of the Ministry of Railways 1520 mm (non-self-propelled)]. (1996). Moscow: HosNIIV – VNIIZhT, p. 319 [in Russian]
3. Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliynytsiakh Ukrainy Tst-TsV-TsL-0015 [Instructions on the operation of rolling stock brakes on the railways of Ukraine]. (2002). Kyiv: «Transport Ukrainy», p. 143 [in Ukrainian]
4. Inozemtsev V.G. & Grebenyuk P.T. (1971). Normy i metody raschieta avtotormozov [Standards and methods for calculating automatic brakes]. Moscow: "Transport", p. 57 [in Russian]
5. Hriebieniuk P., Dolhanov A. & Skvortsova A. (1987). Tiahovye raschiety [Traction calculations]. Moscow: "Transport", p. 272 [in Russian]
6. Hrebeniuk P. T. (2004). Pravila tormoznykh raschitetov [Rules of brake calculations]. Moscow: "Intext", p. 112 [in Russian]

РЕЙКОВИЙ РУХОМІЙ СКЛАД

7. *TsV-TsL-0013 Instruktsiia z remontu hal'mivnoho obladnannia vahoniv [Instruction on repair of brake equipment of cars]*. (2005). Kyiv, p. 160 [in Ukrainian]
8. Tormoznyie sistemy zhileznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody ispytanii [Braking systems of railway rolling stock. Test methods]. (2016). HOST 33597-2015. Moskow: Standartinform [in Russian]
9. Vodjannikov Ju. Ja., Vasilenko V.S. & Olgard L.S (2014) Mietodologiya proviedieniia poiezdnih tormoznyh ispytanii dla opredeleniia tormoznoi effektivnosti yediniti podvizhnogo sostava [Methodology for train braking testing to determine the braking efficiency of rolling stock units]. *Vagonnyi park – Wagon fleet*, 02 (83), 9-13 Kharkiv [in Russian]
10. Vodjannikov Ju. Ja., Safronov A. M. & Zhihartsev K. L. (2008). Mietodika eksperimentalnogo issledovaniia tormoznoi effektivnosti i tormoznyh harakteristik ediniti podvizhnogo sostava. *Vagonnyi park – Wagon fleet*, 3, 14-17 [in Russian]
11. Safronov A.M, Vodjannikov Y. Ya. & Makeieva E. H. (2018). Tormoznaia effektivnost hruzovykh vahonov. Metodolohii raschietnykh i eksperimentalnykh yssledovanii s yspolzovaniem matematicheskikh modelei y kompiuternoho modelirovaniia [Brake efficiency of freight wagons. The methodology of calculation and experimental studies using mathematical models and computer simulations]. *Monograph*. Kremenchuk: SE „UkrNIIIV”, p.173 [in Russian]
12. Vodyannikov Yu. Ya. & Vasilenko V.S. (2013). Programmnyi kompleks dlja eksperimentalnogo issledovaniia tormoznyh sistem yediniti podvizhnogo sostava zheleznyh doroh [Software package for experimental research of brake systems of railway vehicles]. *Reikovi ruhomyi sklad* - Railbound rolling stock, 9, 38-47, Kremenchuk: DP „UkrNDIV” [in Russian]
13. Mitropolskii A. K. (1971). *Tiekhnikha statisticheskikh vychislenii [Technique of statistical computation]*. Moscow: Nauka, p. 576 [in Russian]
14. Guter R.S & Ovchinskij B.V. (1970). *Eliementy chislennoho analiza i matiematicheskoi obrabotki rezul'tatov optya [Elements of numerical analysis and mathematical processing of experimental results]*. "Nauka" [in Russian]
15. Ibrahimov N.H. (2007). *Prakticheskii kurs differentsialnyh uravnenii i matiematicheskogo modelirovaniia. Klassicheskie i novye mietody. Nelineinyye matiematicheskie modeli. Simmetriia i printsip invariantnosti*. [Practical course in differential equations and mathematical modeling. Classic and new methods. Nonlinear mathematical models. Symmetry and the principle of invariance]. (Yemieljanova I. S., Trans). Nizhnii Novhorod: Yizdatelstvo nizhniehorodskoho gosuniversiteta im. N. I. Lobachevskoho, p. 421 [in Russian]
16. Kopchienova N.V. & Maron I.A. (1972). *Vychislitel'naya matematika v primierah i zadachah [Computational Mathematics in Examples and Problems]*. Moscow: «Nauka», p. 367 [in Russian]
17. Vodyannikov Yu. Ya., Svistun S.M. & Makeieva E.H. (2014). Metodologiya piereschieta tormoznoi effektivnosti odinochnoho vahona na tormoznuu effektivnost poezda Methodology for recalculating the braking efficiency of a single car to the braking efficiency of a train]. *Zaliznychnyi transport – Railway transport*, 2/2, 27-37 [in Russian]
18. *Protokol № 0033-2020 vid 24 lipnya 2020 roku poperednih vyprobuvan vahona-tsisterny modeli 15-7140 [Test report No. 0033-2020 of July 24, 2020 on preliminary tests of the tank car model 15-7140 (train brake tests)]* [in Ukrainian]
19. *Protokol № 0029-2020 vid 30 chervnya 2020 roku poperednih vyprobuvan vahona-tsisterny modeli 15-7140 (statsionarni hal'mivni vyprobuvannia) Test report No. 0029-2020 of June 30, 2020 of preliminary tests of the tank car model 15-7140 (stationary brake tests)* [in Ukrainian]
20. *CSH/0001. Instruktsiia z syhnalizatsii na zaliznytsiakh Ukrayny [Instruction on signaling on the railways of Ukraine]*. (2008). Kiiv [in Ukrainian].