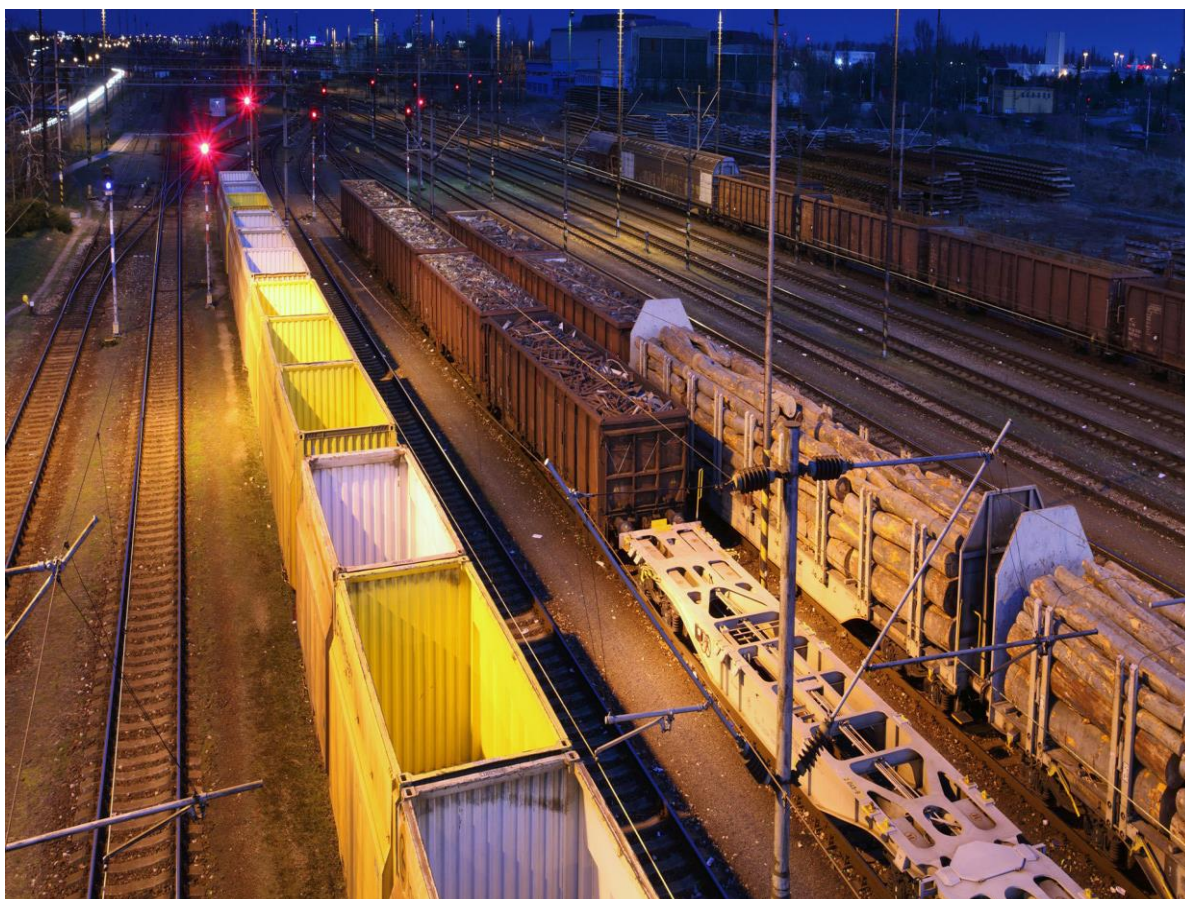


А.М. Сафронов, Ю.Я. Водяников, Е.Г. Макеева

ТОРМОЗНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ.

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



г. Кременчуг 2018 г.

УДК 629.4.077-592(075.8)

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
(ГП «УкрНИИВ»)

А.М. Сафронов, Ю.Я. Водяников, Е.Г. Макеева

ТОРМОЗНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ. МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Монография

*Рекомендовано к печати научно-техническим советом
Украинского научно-исследовательского института вагоностроения
(протокол № 3 от 26.04.2018 г.)*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Кельрих М.Б.

д-р техн. наук, проф. Мартынов И.Э.

Тормозная эффективность грузовых вагонов. Методология расчетных и экспериментальных исследований с использованием математических моделей и компьютерного моделирования: монография / А.М. Сафронов, Ю.Я. Водяников, Е.Г. Макеева

ISBN 978-966-97716-1-2

Предложена методология расчетных и экспериментальных исследования тормозной эффективности грузовых вагонов, которая базируется на компьютерном моделировании процессов торможения на основе реализации информационной модели в виде дифференциального уравнения движения вагона при торможении. Приведены математические модели для тормозных систем с композиционными и чугунными колодками, учитывающие основные характеристики вагона и тормозной системы. В основу методологии расчетных и экспериментальных исследований положены универсальные формулы степенных зависимостей параметров торможения. Описаны алгоритмы решения дифференциальных уравнений, реализованных в виде пакета прикладных программ для ЭВМ, написанных на языке VBA (Visual Basic for Application) в среде Excel. Представленная методология значительно расширяет количество параметров тормозного процесса, используемых для анализа тормозной эффективности грузовых вагонов по результатам ходовых тормозных испытаний: фактические значения тормозных коэффициентов и удельных тормозных сил; действительные значения коэффициентов трения колодок; фактические значения коэффициентов сцепления колеса и рельса при торможении; тормозные пути грузового поезда на площадке и нормированных спуска (- 6 ‰ и - 10 ‰) для заданного количества вагонов в составе поезда с учетом нарастания тормозной силы по составу поезда; замедление грузового вагона и поезда в процессе торможения, а также их средние значения. Приведены примеры расчетных и экспериментальных исследований грузовых вагонов. Монография предназначена для инженерно-технических работников, связанных с расчетными и экспериментальными исследованиями тормозных систем подвижного состава, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Авторское участие в написании монографии: Сафронов А.М. – Предисловие, разделы 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, Заключение; Водяников Ю.Я. – Предисловие, разделы 6, 9, 10, Заключение; Макеева Е.Г. – раздел 1, редактирование текста.

УДК 629.4.077-592(075.8)

ISBN 978-966-97716-1-2

Оглавление

<u>РАЗДЕЛ</u>	стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ТОРМОЗНЫЕ СИСТЕМЫ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ	7
1.1 Типовая тормозная система	7
1.2 Тормозные системы грузовых вагонов с потележечным торможением	11
РАЗДЕЛ 2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЕЛИЧИНУ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ СИЛЫ НАЖАТИЯ КОЛОДОК НА КОЛЕСА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ	15
РАЗДЕЛ 3. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ТОРМОЗНЫХ ЦИЛИНДРАХ ЧЕРЕЗ АВТОРЕЖИМ	21
РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ	30
4.1 Исследования фрикционных свойств тормозной колодки на инерционном стенде	30
4.2 Исследования температурного воздействия на коэффициент трения композиционной колодки	44
4.3 Расчетные зависимости для определения фактических коэффициентов трения по результатам ходовых тормозных испытаний вагонов	47
4.4 Расчетно-экспериментальные исследования температуры нагрева колеса по результатам ходовых тормозных испытаний грузового вагона	49
.....	
РАЗДЕЛ 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТОРМОЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА	53
5.1 Функциональные зависимости между варьируемыми выходными параметрами	57
5.2 Определение фактического значения расчетного тормозного коэффициента с использованием компьютерного моделирования	61
.....	
5.3 Методология пересчета тормозного пути отдельного вагона на тормозную эффективность грузового поезда	61
.....	
5.4 Описание пакета прикладных программ	65
РАЗДЕЛ 6. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	71
6.1 Стационарные испытания тормозной системы вагона	72
6.2 Методология ходовых тормозных испытаний	72
6.3 Технология проведения ходовых тормозных испытаний методом «бросания»	75
6.4 Аппаратно-программный измерительный комплекс для определения и оценки тормозной эффективности единиц подвижного состава	76
.....	
6.5 Описание программного комплекса для записи и обработки первичной информации при ходовых тормозных испытаниях	80
.....	
РАЗДЕЛ 7. МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	85
7.1 Определение параметров тормозной системы грузового вагона с осевой нагрузкой 245 кН/ось (25,0 тс/ось)	93
РАЗДЕЛ 8. ТОРМОЗНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С ОСЕВОЙ НАГРУЗКОЙ 245 КН/ОСЬ (25 ТС/ОСЬ)	97
8.1 Расчетные исследования тормозной эффективности	98
8.2 Стационарные испытания тормозной системы вагона	101
8.3 Ходовые тормозные испытания вагона	106
8.4 Температура нагрева колеса при экстренном торможении в исследуемом диапазоне скоростей в начале торможения	116
8.5 Выводы	117
РАЗДЕЛ 9. ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАГОНА ПЛАТФОРМЫ МОДЕЛИ 13-4107	118
9.1 Исследования тормозной эффективности вагона в груженом состоянии при композиционных колодках	119
9.2 Исследования тормозной эффективности вагона в порожнем состоянии при композиционных колодках	124

9.3 Температура нагрева колеса при экстренном торможении в исследуемом диапазоне скоростей в начале торможения	128
9.4 Выводы	129
РАЗДЕЛ 10. ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУВАГОНА	
МОДЕЛИ 12-7023 НА ТЕЛЕЖКАХ МОДЕЛИ 18-7020	130
10.1 Исследования тормозной эффективности вагона в груженом состоянии	131
10.2 Исследования тормозной эффективности вагона в порожнем состоянии при композиционных колодках	138
10.3 Температура нагрева колеса при экстренном торможении в исследуемом диапазоне скоростей в начале торможения	142
10.4 Выводы	143
РАЗДЕЛ 11. ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАГОНА -	
ПЛАТФОРМЫ МОДЕЛИ 13-4128	145
11.1 Исследования тормозной эффективности вагона в груженом состоянии	146
11.2 Исследования тормозной эффективности вагона в порожнем состоянии	151
11.3 Температура нагрева колеса при экстренном торможении в исследуемом диапазоне скоростей в начале торможения	155
11.4 Выводы	155
РАЗДЕЛ 12. ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ	
МОДЕЛИ 15-9049 МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ТОРМОЖЕНИЙ	157
12.1 Исследования тормозной эффективности вагона в груженом состоянии	158
12.2 Исследования тормозной эффективности вагона в порожнем состоянии	164
12.3 Температура нагрева колеса при экстренном торможении в исследуемом диапазоне скоростей в начале торможения	168
12.4 Выводы	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	172

ПРЕДИСЛОВИЕ

Устойчивая работа железнодорожного транспорта во многом определяется техническим уровнем вагонного парка. Поэтому задачам по созданию вагонов нового поколения, отличающихся улучшенными потребительскими и эксплуатационными характеристиками, совершенствованию системы ремонта и технического обслуживания вагонного парка придается первостепенное значение. Для обеспечения этого ведутся работы по созданию типоразмерного ряда грузовых тележек по допускаемым осевым нагрузкам 196; 245; 265; 294 кН (20, 25, 27, 30 тс) и скоростям движения до 140 км/ч.

В вагонах нового поколения закладываются более совершенные узлы и детали, использование которых позволит существенно улучшить показатели безопасности движения, на порядок уменьшить число отцепов вагонов в текущий ремонт.

Переход на новые технологии производства вагонов, деталей ходовых частей, автосцепного устройства, тормозного оборудования вагонов позволит увеличить их безремонтные пробеги с (120—160) тыс. км до 1 млн. км.

Отдельные грузы, перевозимые грузовыми вагонами, являются опасными и высокоопасными как для людей, так и для окружающей среды (аммиак, хлор, взрывчатые вещества, радиоактивные отходы и т.п.), поэтому задачи по обеспечению безопасности движения грузовых поездов, а также сохранности грузов являются первостепенными. Такие задачи должны быть направлены на улучшение динамических и прочностных качеств конструкции, надежности и эффективности тормозной системы грузовых вагонов.

Важнейшим фактором по обеспечению безопасности движения грузовых поездов является тормозная система. Дальнейшее развитие грузовых вагонов в направлении повышения скоростей и осевой нагрузки в одну из основных выдвигает задачи совершенствования методов расчетных и экспериментальных исследований тормозной эффективности (величины тормозного пути при экстренном пневматическом торможении с максимальной (конструкционной) скоростью в начале торможения). В этих условиях ограничение экспериментальных исследований только оценкой тормозного пути одиночного вагона является недостаточной. Поэтому основной целью ходовых тормозных испытаний вагона должно стать не только определение его тормозного пути при различных скоростях в начале торможения, но и оценка способности вагона обеспечить тормозную эффективность грузового поезда как на площадке, так и на нормированных спусках, а также оценка основных параметров процесса торможения, влияющих на тормозную эффективность.

Исходя из изложенного, дальнейшее развитие тормозных систем и повышение тормозной эффективности вагонов невозможно без применения новых более углубленных методов экспериментального исследования и анализа процессов торможения. 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. Указанные исследования требуют более совершенных способов и методов по оценки тормозной эффективности как вагонов, так и новых тормозных систем.

Особое внимание в методике должно быть уделено математическим методам обработки и анализу опытных данных, в том числе установлению эмпирических зависимостей, аппроксимации связей между варьируемыми характеристиками, установлению критериев и доверительных интервалов. Такие исследования невозможно провести без применения компьютерного моделирования.

В процессе отработки новой конструкции вагона на стадии проектирования и выбора его основных рациональных параметров и характеристик параллельно с расчетами проводятся экспериментальные исследования в лабораториях на моделях, макетах, натурных узлах и опытных образцах вагонов.

Основной целью расчетных и экспериментальных исследований единиц подвижного состава железных дорог, в частности вагонов, является определение и оценка тормозной эффективности, а также параметров тормозной системы на соответствие нормативным требованиям.

Объем и степень подробности испытаний зависит от того, на каком этапе создания конструкции вагона они выполняются.

Наиболее полная и достоверная информация о технических характеристиках и тормозных свойствах вагона может быть получена в процессе ходовых тормозных испытаний на эксплуатационных участках железнодорожного пути различного состояния или на специально приспособленных для этих целей испытательных полигонах.

В общем случае задачами исследования тормозных систем подвижного состава должно являться определение таких параметров как:

- изменение давлений в тормозных приборах, а 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.

Вместе с тем, 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 иной подход для решения указанной задачи. Выходом, по нашему мнению, может стать совместное использование экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Как правило, ходовые тормозные испытания проводятся для одиночного вагона методом «бросания», что позволяет получить наиболее достоверные тормозные пути при различных скоростях в начале торможения. Тормозные пути в пересчете на поезд, а также тормозные коэффициенты определяются косвенным методом по таблицам или номограммам, что обуславливает приближенное значение этих параметров. Широко употребляемый в тормозной практике термин «тормозная эффективность» не имеет количественного измерения, а подразумеваемая при этом длина тормозного пути неоднозначна, так как зависит от множества факторов: скорости торможения, уклона, типа тормозных колодок, силы нажатия и т.д. Косвенные показатели тормозной эффективности: расчетный тормозной коэффициент и удельная тормозная сила – ориентированы на оценку только максимальных тормозных параметров без учета динамики их изменения и дают лишь приближенную характеристику для совершенства тормозных устройств. В этой связи, с учетом современных требований, возникает потребность оценки тормозной системы грузового вагона с учетом таких параметров как:

- фактические значения тормозных путей вагона и поезда (при заданном количестве вагонов) при различных режимах торможения на площадке и нормированных спусках;
- динамика изменения тормозных коэффициентов в процессе торможения и их приведение к нормативным требованиям, что обуславливает пересчет на чугунные колодки;
- динамика изменения действительных коэффициентов трения;
- динамика изменения коэффициентов сцепления колеса с рельсом при торможении;
- динамика изменения замедления вагона и поезда (при заданном количестве вагонов) при различных режимах торможения на площадке и нормированных спусках;
- действительные значения сил нажатия колодок в пересчете на чугунные на 981 кН (100 тс) веса поезда.