

УДК 629.4.014

## Способ определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний

**Ю. П. Бороненко, А. А. Комайданов**

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

**Для цитирования:** Бороненко Ю. П., Комайданов А. А. Способ определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 154–173. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-154-173

### Аннотация

**Цель:** разработка усовершенствованного метода определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний, позволяющего повысить точность измерений и снизить затраты на проведение испытаний. **Методы:** основное сопротивление движению одиночного вагона определяется экспериментально, а аэродинамическая составляющая одиночного вагона и в составе поезда рассчитывается на цифровых моделях. **Результаты:** разработана и апробирована методика испытаний по определению основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний, которая позволяет существенно сократить расходы на них. **Практическая значимость:** возможность существенного снижения затрат на определение сопротивления движению, повышение точности измерений за счет исключения ряда погрешностей. Разработанный метод можно использовать при приемочных испытаниях новых вагонов и получать уточненные значения по основному сопротивлению движению для оценки их энергетической эффективности.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, сопротивление движению, энергетическая эффективность вагона, ходовые тормозные испытания

### Введение

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов в стране. В структуре затрат ОАО «РЖД» доля топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на тягу поездов, превышает 60% [1]. Энергетическая эффективность является важным фактором повышения конкурентоспособности железных дорог на рынке транспортных услуг.

Основные документы в области энергосбережения [2, 3] указывают в качестве одного из важнейших направлений снижения энергопотребления совершенствование системы анализа, планирования и нормирования расходов топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, в том числе с применением новых информационных технологий [4, 5]. Расход топливно-энергетических ресурсов зависит не только от тягово-энергетических характеристик локомотивов, но и от технико-экономических характеристик, а также от сопротивления движению находящихся в поезде вагонов [6–8]. Поэтому для учета и оценки электроэнергии

или дизельного топлива, затраченных на ведение поездов, необходимо знать сопротивление вагонов в поезде.

В настоящее время для оценки основного сопротивления движению подвижного состава применяются три основных подхода: экспериментальные методы [9]; компьютерное моделирование с использованием цифровых моделей подвижного состава [10] и физическое моделирование, основанное на продувке моделей железнодорожных экипажей в аэродинамической трубе [11].

Несмотря на разнообразие методов, результаты обычно представляются в виде квадратного трехчлена (формула Дэвиса):

$$w = A + Bv + Cv^2, \quad (1)$$

где  $w$  — основное сопротивление движению;

$v$  — скорость движения вагона, м/с;

$A, B, C$  — коэффициенты, зависящие от нагрузки на ось, типа подвижного состава и конструкции ходовых частей.

Компьютерное и физическое моделирование позволяет достаточно точно вычислить аэродинамическое сопротивление, но точность измерения механического сопротивления недостаточна.

В свою очередь, экспериментальные методы определения основного сопротивления движению подразделяются на три основных подхода:

1. Динамометрический метод определения основного сопротивления движению основан на включении между локомотивом и составом однородных вагонов (в количестве не менее 65 шт.) динамометрического вагона для регистрации силы тяги, после чего рассчитывается основное сопротивление движению одного вагона. Данный метод отличается высокой стоимостью, а именно необходимостью исключения из эксплуатации порядка 65 вагонов и проведения погрузочно-разгрузочных работ.

2. Метод скатывания основан на измерении величины замедления единицы подвижного состава с известной начальной скорости. По полученному замедлению вычисляется основное сопротивление движению исследуемой подвижной единицы. Однако применение данного метода к грузовым вагонам затруднено из-за различной аэродинамической составляющей отдельной единицы подвижного состава и в поезде в процессе движения.

3. Метод энергетического баланса — способ экспериментального определения основного сопротивления, суть которого заключается в измерении затрат энергии на передвижение вагона и вычитании из них прочих энергетических потерь. Основным недостатком данного метода является широкая область среднеквадратического отклонения из-за метода подсчета [12].

В работах [13, 14] предложен расчетно-экспериментальный метод, объединяющий компьютерное моделирование и эксперимент. Механическая составляющая

сопротивления движению определяется классическим методом скатывания, в то время как аэродинамическая рассчитывается посредством цифровых моделей. Основным достоинством этого метода является существенное снижение затрат на определение основного сопротивления движению грузовых вагонов, так как в испытаниях участвует одна единица подвижного состава вместо 65 единиц одной модели.

Однако и в этом способе имеются недостатки:

- высокая степень рассеивания экспериментальных данных, связанная с дифференцированием при определении ускорения, из-за чего возникает необходимость применения фильтра Калмана 2-го порядка (фрагмент экспериментальных данных и их фильтрация алгоритмом Калмана 2-го порядка представлены на рис. 1);

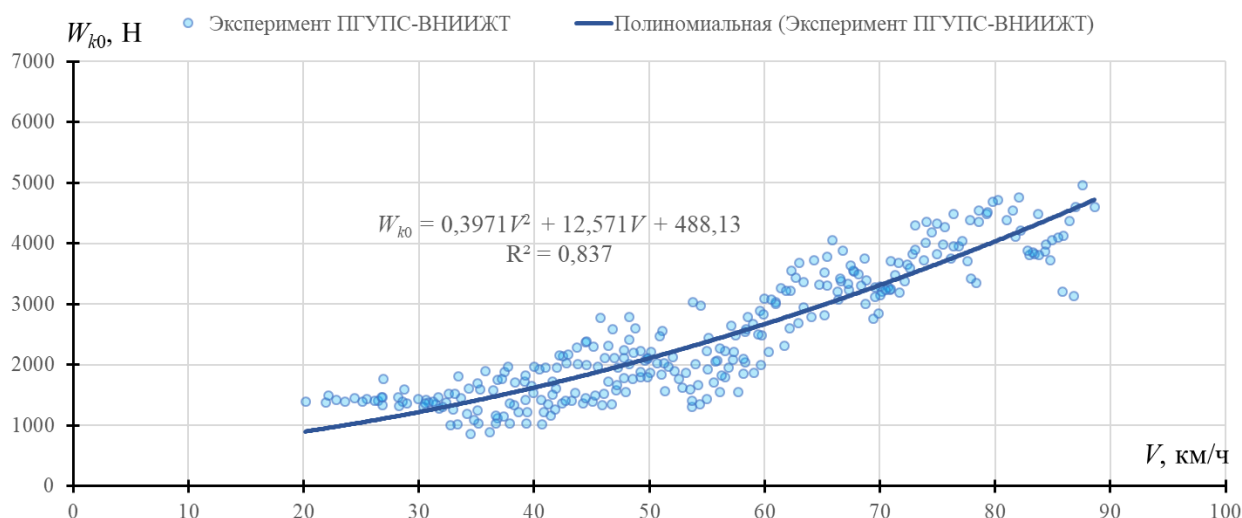
- при определении ускорения исследуемого вагона используется среднее значение уклона по длине участка, а не его мгновенное значение, из-за чего возникает дополнительное рассеивание экспериментальных данных (рис. 2);

- анализируется весь процесс замедления, не позволяющий вычислить ускорение исследуемого вагона в аналитической форме.

В связи с этим предлагается повысить точность измерения основного сопротивления движению, исключив дифференцирование при определении ускорения исследуемого вагона с учетом мгновенного значения уклона пути и его сопоставления с данными о положении вагона, полученными при посекундной регистрации, а также с применением более точного GNSS-приемника.



**Рис. 1.** Экспериментальная запись ускорения и ее вид после фильтрации алгоритмом Калмана 2-го порядка [14]



**Рис. 2.** Зависимость полного основного сопротивления движению вагона от скорости его движения, полученная при помощи фильтрации экспериментальных данных [14]

Кроме того, предлагается вариант испытаний, который совместно с проведением ходовых тормозных испытаний обеспечит снижение стоимости и трудоемкости. В соответствии с данной методикой основное удельное сопротивление движению грузового вагона будет определяться на испытательном полигоне совместно с проведением ходовых тормозных испытаний, которые обязательны для каждого нового вагона при его постановке на производство.

### Теоретическое обоснование уточненного способа определения основного сопротивления движению при проведении ходовых тормозных испытаний

Уравнение движения одиночного четырехосного вагона в режиме выбега имеет вид:

$$\left( m + \frac{4J}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} = mg \frac{dz}{dx} - W_{k0}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса вагона;

$g$  — ускорение свободного падения;

$J$  — момент инерции колесных пар вагона;

$r$  — радиус колеса колесной пары вагона;

$t$  — время;

$v$  — скорость движения вагона;

$z, x$  — вертикальная и продольная координаты вагона во время движения соответственно;

$W_{k0}$  — основное сопротивление движению одиночного вагона;

$w_{k0} = \frac{W_{k0}}{m}$  — удельное основное сопротивление движению одиночного вагона.

При введении коэффициента инертности вращающихся масс  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{4J}{mr^2}, \quad (3)$$

уравнение (2) примет вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (gi(x) - w_{k0}), \quad (4)$$

где  $i(x) = \frac{dz}{dx}$  — уклон пути.

Величина уклона пути считается заранее известной на всей протяженности испытательного участка за счет нивелировки пути. Значение  $i(x)$  принимают со знаком «минус» при подъемах и со знаком «плюс» при спусках.

Так как опытные броски проводились вверх по уклону, из выражения (4) получим:

$$w_{k0} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \frac{dv}{dt}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что сопротивление движению одиночного вагона можно определить, зная уклон пути и дифференцируя скорость движения одиночного вагона.

В свою очередь, навигационный приемник при определении скорости также проводит дифференцирование пройденного пути. Повторное дифференцирование вносит существенные ошибки в вычисление ускорения (замедления) вагона. Поэтому в диапазоне снижения скорости на 10 км/ч движение предлагается считать равнозамедленным, записав следующие выражения для определения ускорения через начальную  $v_{0k}$  и конечную  $v_k$  скорости, координаты положения вагона и время движения вагона на определенном участке железнодорожного пути:

$$w_{k0ij} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \left( \frac{v_{kij} - v_{0kij}}{\Delta t_{ij}} \right), \quad (6)$$

$$w_{k0ij} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \left( \frac{v_{0kij}^2 + v_{kij}^2}{2(x_{kij} - x_{0kij})} \right), \quad (7)$$

$$w_{k0ij} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \left( \frac{2(x_{kij} - x_{0kij})}{(\Delta t_{ij})^2} + \frac{2v_{0kij}}{\Delta t_{ij}} \right), \quad (8)$$

где  $v_{0kij}$ ,  $v_{kij}$  — начальная и конечная скорости движения исследуемого вагона на измерительном участке, м/с;

$\Delta t_{ij}$  — время пробега вагона на исследуемом участке, с;

$x_{0kij}, x_{kij}$  — положение исследуемого вагона в момент начала и конца измерительного участка соответственно, м;

$i$  — номер испытания со средней скоростью  $v_{cpkij}$  ( $i = 1 \dots m$ );

$j$  — номер броска со средней скоростью  $v_{cpkij}$  ( $j = 1 \dots n$ ).

Для каждого броска вычисляется средняя скорость движения  $v_{cpk}$  исследуемого вагона в режиме выбега для участка, на котором измеряется основное удельное сопротивление движению вагона:

$$v_{cpkij} = \frac{v_{0kij} + v_{kij}}{2}. \quad (9)$$

Выбор окончательной формулы для определения ускорения предлагается произвести по результатам экспериментов.

После определения удельного основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона  $w_{k0ij}$  для каждой из скоростей  $v_{cpkij}$  в порожнем и груженом режиме исследуемого вагона методом наименьших квадратов строятся кривые зависимости  $w_{k0ij} = f(v_{cpkij})$  с целью определения удельного основного сопротивления движению исследуемого вагона в диапазоне его скоростей движения:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ w_{k0ij} - (A + Bv_{cpkij} + Cv_{cpkij}^2) \right]^2 = \min. \quad (10)$$

Аэродинамическая составляющая основного сопротивления движению в данной работе определяется по апробированной методике [10].

В результате расчета определяются величины аэродинамического сопротивления для отдельных элементов конструкции исследуемого вагона: лобовое сопротивление вагона  $w_{\text{лоб}}$ , сопротивление ходовых частей вагона  $w_{\text{хч}}$ , сопротивление межвагонного пространства  $w_{\text{мв}}$ , сопротивление внутренних частей кузова  $w_{\text{вн}}$ , сопротивление боковых стен  $w_{\text{бс}}$ , сопротивление подвагонного оборудования  $w_{\text{подв}}$ , хвостовое сопротивление вагона  $w_{\text{хв}}$  (или хвостовое сопротивление последнего вагона при расчете основного сопротивления движению вагона в составе поезда).

Полное аэродинамическое сопротивление одиночного исследуемого вагона  $w_{\text{аэр.0}}$  и вагона в составе поезда  $w_{\text{аэр.н}}$  определяются по выражениям (11) и (12) соответственно [13]:

$$w_{\text{аэр.0}} = w_{\text{лоб}} + w_{\text{бс}} + w_{\text{вн}} + w_{\text{подв}} + w_{\text{хч}} + w_{\text{хв}}, \quad (11)$$

$$w_{\text{аэр.н}} = \frac{(\sum w_{\text{мв}} + \sum w_{\text{бс}} + \sum w_{\text{вн}} + \sum w_{\text{подв}} + \sum w_{\text{хч}})}{n} + w_{\text{хв}}. \quad (12)$$

Основное сопротивление движению одиночного вагона  $w_{k0}$  является суммой механического  $w_{\text{мех.0}}$  и аэродинамического  $w_{\text{аэр.0}}$  сопротивлений:

$$w_{0k} = w_{\text{мех.0}} + w_{\text{аэр.0}} \quad (13)$$

Из формулы (13) находим механическое сопротивление одиночного вагона  $w_{\text{мех.0}}$  как разницу сопротивления движению  $w_{k0}$ , определенного экспериментально, и аэродинамического сопротивления одиночного вагона  $w_{\text{аэр.0}}$ , которое определяется на цифровых моделях:

$$w_{\text{мех.0}} = w_{0k} - w_{\text{аэр.0}} \quad (14)$$

После определения аэродинамического сопротивления одиночного вагона  $w_{\text{аэр.0}}$  становится необходимым определить аэродинамическое сопротивление этого же вагона, но уже не одиночного, а в составе поезда  $w_{\text{аэр.п}}$ . Для этого вновь вычисляется аэродинамическое сопротивление исследуемого вагона в составе поезда  $w_{\text{аэр.п}}$ .

Основное сопротивление движению вагона в составе поезда, которое и применяется при проведении тяговых расчетов, определяется как сумма механического и аэродинамического сопротивления вагона в составе поезда  $w_{\text{аэр.п}}$  минус аэродинамическое сопротивление одиночного вагона  $w_{\text{аэр.0}}$ :

$$w_k = w_{0k} - w_{\text{аэр.0}} + w_{\text{аэр.п}} \quad (15)$$

### Методика и оборудование для экспериментального определения основного сопротивления движению

Перед началом испытаний формировался опытный поезд, состоящий из локомотива, вагона-лаборатории и исследуемого вагона, как показано на рис. 3.

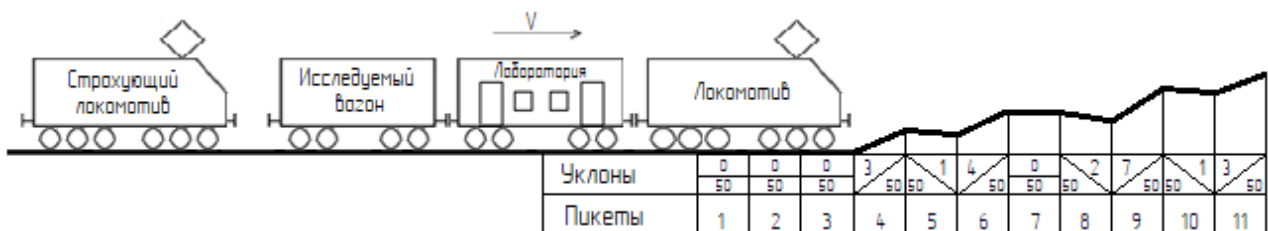


Рис. 3. Схема формирования опытного поезда и продольный профиль пути

На исследуемом вагоне производятся монтаж и проверка оборудования: прибора включения тормоза, при помощи которого тормоза исследуемого вагона не приходят в действие в момент расцепки с вагоном-лабораторией, а срабатывают

в нужный момент при помощи пульта дистанционного управления; навигационного GNSS-приемника Geobox ForaOne Plus, подключенного при помощи Bluetooth-соединения к контроллеру для дистанционной передачи данных. Общий вид GNSS-приемника представлен на рис. 4, а его технические характеристики — в табл. 1.



Рис. 4. Общий вид GNSS-приемника ForaOne Plus

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики GNSS-приемника ForaOne Plus

Характеристика	Значение
Количество каналов	1408
Принимаемые сигналы	Unicore UM980: GPS L1C/A, L1C, L2C, L2P(Y), L5, BDS B1I, B2I, B3I, B1C, B2a, B2b, GLONASS G1, G2, G3, Galileo E1, E5a, E5b, E6, QZSS L1C/A, L1C, L2C, L5, L6, NavIC L5, SBAS L1C/A
Частота позиционирования	До 25 Гц
Точность позиционирования (СКО)	Статика: план 2,5 мм + 0,5 мм/км; высота 5 мм + 0,5 мм/км RTK фикс, PPK: план 8 мм + 1 мм/км; высота 15 мм + 1 мм/км DGNSS: план 0,25 м + 1 мм/км; высота 0,5 м + 1 мм/км
Рабочая температура	-45 ... +80 °C

Точность позиционирования исследуемого вагона вдоль пути данного приемника удовлетворительна ( $\pm 0,25$  м), однако по высоте точность недостаточна ( $\pm 0,50$  м), поэтому используется геодезическая съемка пути испытательного участка.

Опытные поездки проводятся со следующими скоростями расцепа исследуемого вагона от вагона-лаборатории: 30, 50, 70, 90, 100, 110, 120, 130 км/ч (со скоростями торможения 20, 40, 60, 80, 90, 100, 110, 120 км/ч соответственно).

Опытный сцеп разгоняется до скорости движения, близкой к скорости расцепа (от 30 до 130 км/ч). После достижения скорости, превышающей испытательное

значение на величину погрешности (не более 5 % от испытательной скорости), по команде руководителя испытаний производится расцеп вагона-лаборатории и исследуемого вагона при помощи расцепного устройства.

После расцепа исследуемого вагона с вагоном-лабораторией проводится запись пройденного исследуемым вагоном пути и скорости его движения. В момент снижения скорости движения исследуемого вагона на 10 км/ч (независимо от начальной опытной скорости) на прибор включения тормоза подается сигнал на приведение тормоза в действие, при этом продолжается непрерывная регистрация пройденного пути и скорости движения исследуемого вагона до его полной остановки.

По измеренной скорости движения исследуемого вагона и его пройденному пути до начала торможения (расстояние, которое проходит вагон в режиме выбега, начиная с момента расцепа и заканчивая моментом снижения испытательной скорости на 10 км/ч и приведением тормоза вагона в действие) производится определение основного сопротивления движению одиночного испытуемого вагона. Тормозной путь исследуемого вагона определяется с момента приведения тормоза вагона в действие до его полной остановки традиционным методом.

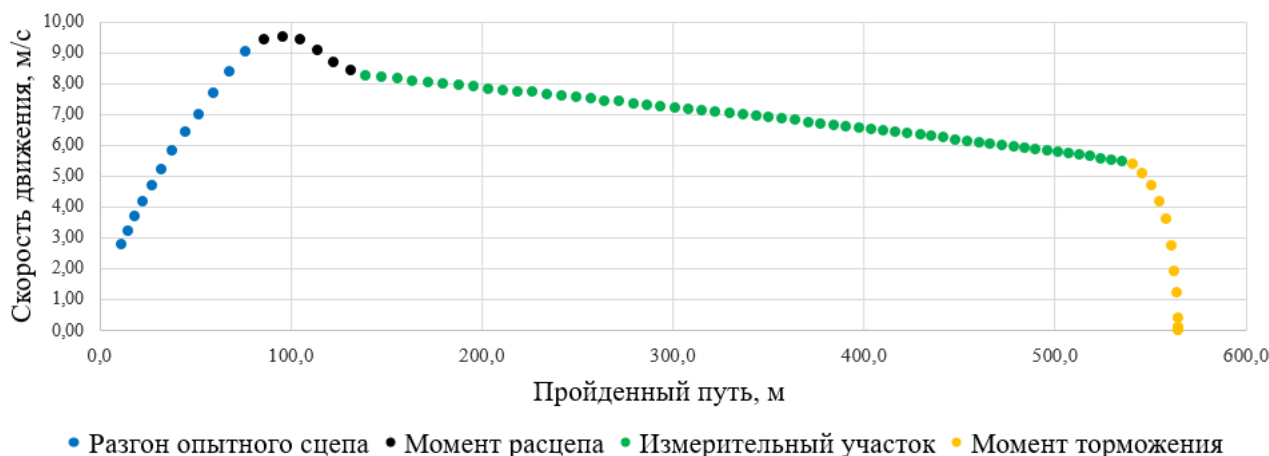
### **Испытания по определению основного сопротивления движению одиночного вагона**

Для проведения испытаний был сформирован опытный сцеп, представленный на рис. 5. Испытания проводились в порожнем (с массой тары 29,05 т) и в груженом (с массой брутто 93,05 т) состояниях. Для каждой опытной скорости выполнялось по три поездки.



**Рис. 5.** Опытный сцеп (фото А. А. Комайданова)

Для каждого из 48 бросков со скоростями расцепа исследуемого вагона и вагона-лаборатории от 30 до 130 км/ч в груженом и порожнем состояниях исследуемого вагона были построены графики, как показано на рис. 6.



**Рис. 6.** График зависимости скорости движения исследуемого вагона от пройденного пути в порожнем состоянии при скорости расцепа 30 км/ч

При обработке данных был применен дифференцированный подход, основанный на посекундной регистрации положения исследуемого вагона и сопоставлении полученных данных с мгновенной величиной уклона пути.

Сопrotивление движению одиночного исследуемого вагона определялось по формуле (6). Обработка данных показала, что формулы (7) и (8) дают большее среднеквадратичное отклонение. Поэтому в дальнейшем использовалась формула (6).

Результаты расчета основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона, определенного по формуле (6) по трем броскам для каждой опытной скорости в груженом и порожнем состояниях, представлены в табл. 2.

В результате статистического анализа экспериментальных данных установлено, что значения среднеквадратичного отклонения (СКО) для основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона  $\sqrt{D(w_{k0cp})}$  говорят о незначительном разбросе полученных значений относительно средних, что позволяет выполнить процедуру статистического усреднения экспериментальных данных.

Графики зависимости ускорения и основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона от скорости его движения представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона в режиме выбега

Порожный режим								
$w_{k0}$ , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	27,8	44,9	64,4	84,8	94,8	104,6	113,9	124,3
Бросок 1	0,53	1,36	2,37	4,00	5,01	5,86	6,87	7,90
Бросок 2	0,54	1,37	2,43	4,00	5,00	6,00	6,91	7,85
Бросок 3	0,57	1,34	2,47	3,99	5,02	6,03	6,75	7,81
$w_{k0cp}$	0,55	1,36	2,42	4,00	5,01	5,96	6,85	7,85
$\sqrt{D(w_{k0cp})}$	0,017	0,013	0,040	0,005	0,006	0,072	0,066	0,034
Груженный режим								
$w_{k0}$ , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	24,7	44,2	64,5	85,0	94,7	105,0	114,8	125,0
Бросок 1	0,87	1,50	2,57	3,54	4,81	5,64	6,70	8,25
Бросок 2	0,80	1,54	2,61	3,49	4,75	5,53	6,85	8,05
Бросок 3	0,82	1,65	2,69	3,44	4,78	5,49	6,81	8,11
$w_{k0cp}$	0,83	1,56	2,62	3,49	4,78	5,55	6,79	8,14
$\sqrt{D(w_{k0cp})}$	0,032	0,062	0,050	0,040	0,025	0,061	0,062	0,084

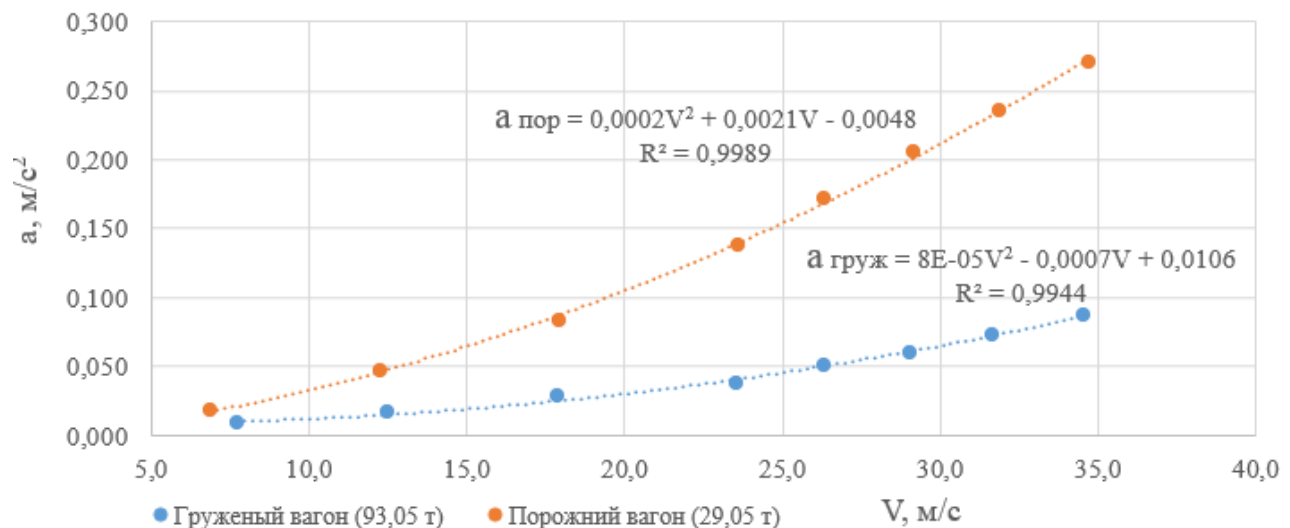
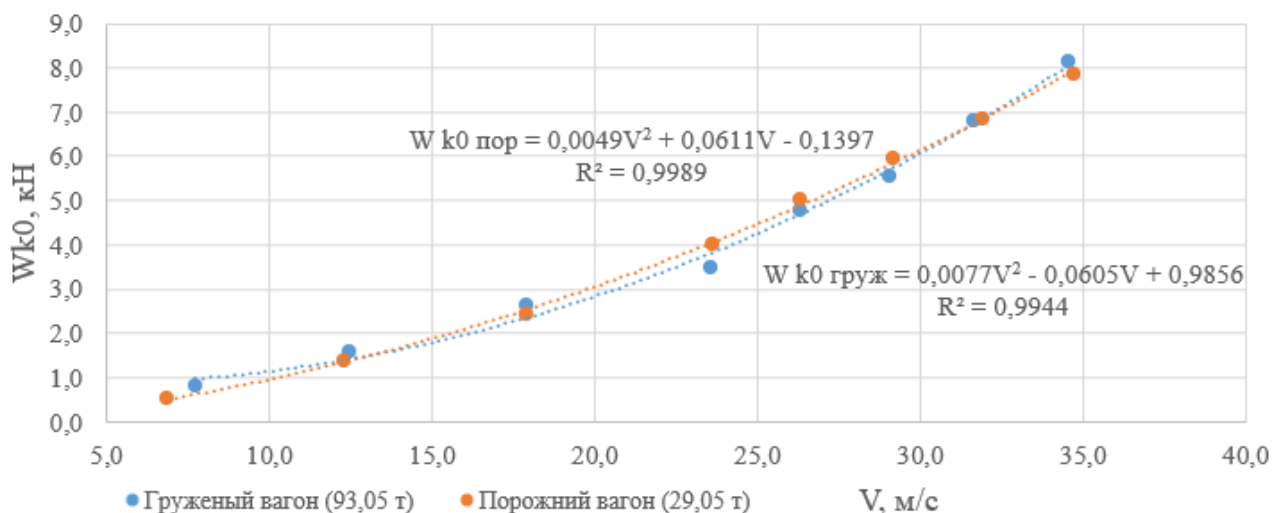


Рис. 7. Графики зависимости ускорения одиночного исследуемого вагона в режиме выбега от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

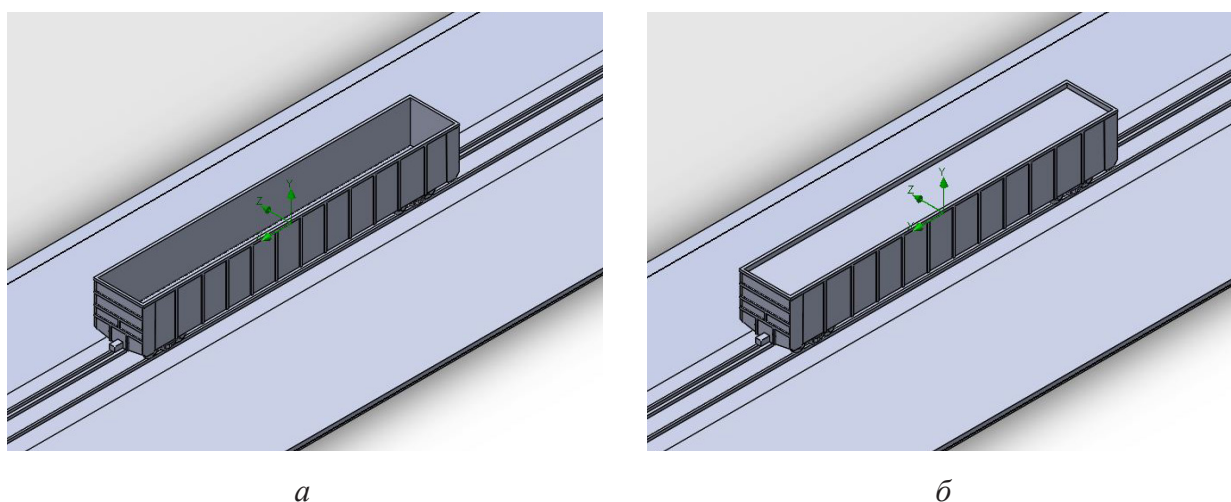


**Рис. 8.** Графики зависимости основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона в режиме выбега от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

Коэффициент детерминации, близкий к единице ( $R^2 = 0,9944$  для груженого вагона и  $R^2 = 0,9989$  для порожнего), подтверждает высокую степень соответствия между аппроксимирующей кривой и экспериментальными данными по основному сопротивлению движению одиночного исследуемого вагона.

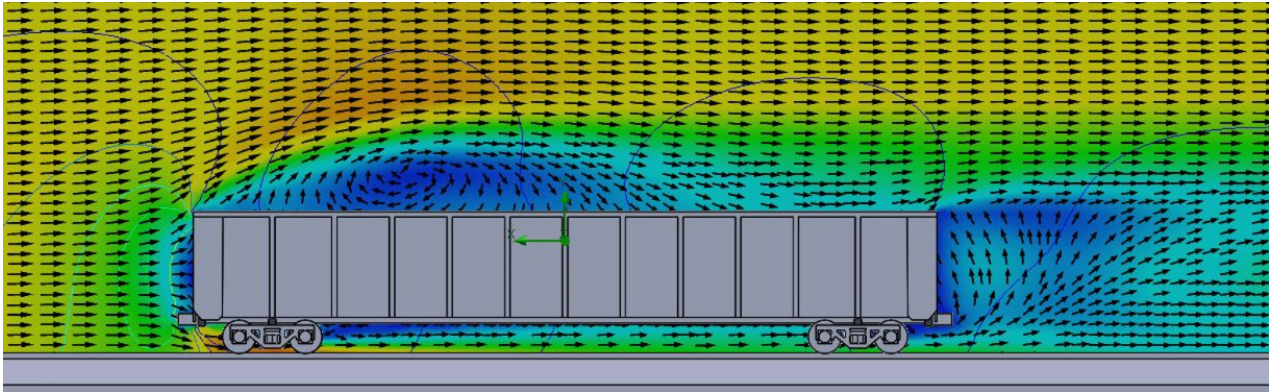
### Определение аэродинамической составляющей сопротивления движению одиночного вагона и в составе поезда

Аэродинамическая составляющая основного сопротивления движению одиночного вагона и вагона в составе поезда определялась на цифровых моделях в программном комплексе SolidWorks (рис. 9) аналогично работе [10].



**Рис. 9.** Цифровые модели одиночного исследуемого полувагона: *а* — цифровая модель одиночного вагона в порожнем состоянии; *б* — цифровая модель одиночного вагона в груженом состоянии

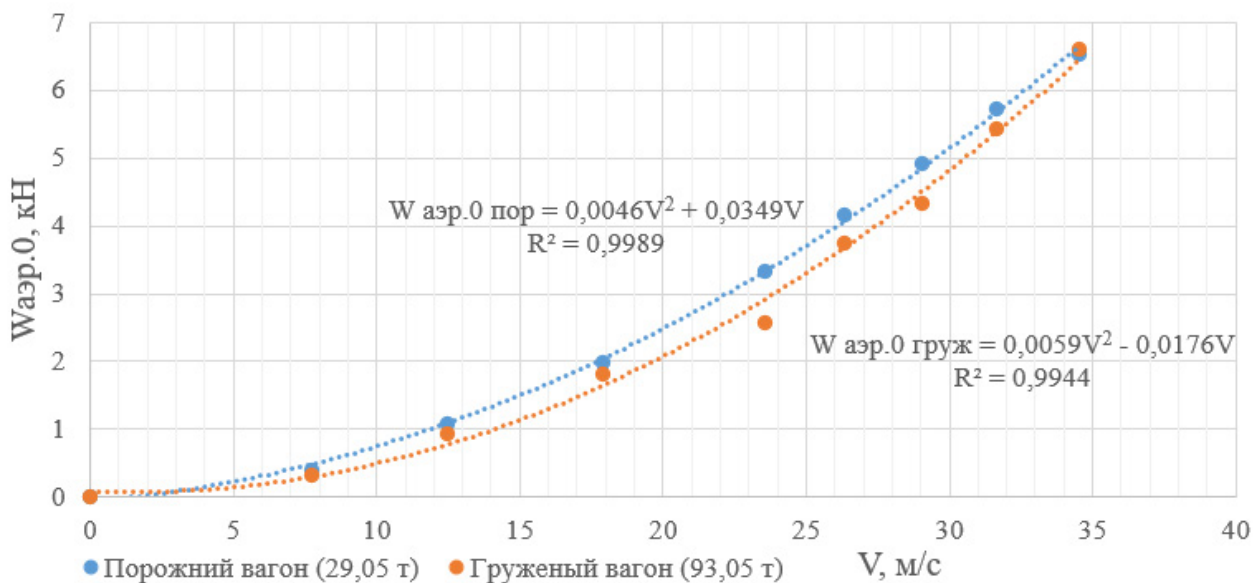
Результаты вычисления аэродинамической составляющей основного сопротивления движению выполнялись итерационно в скоростном диапазоне вагона и поезда от 10 до 130 км/ч с шагом дискретизации 10 км/ч (рис. 10).



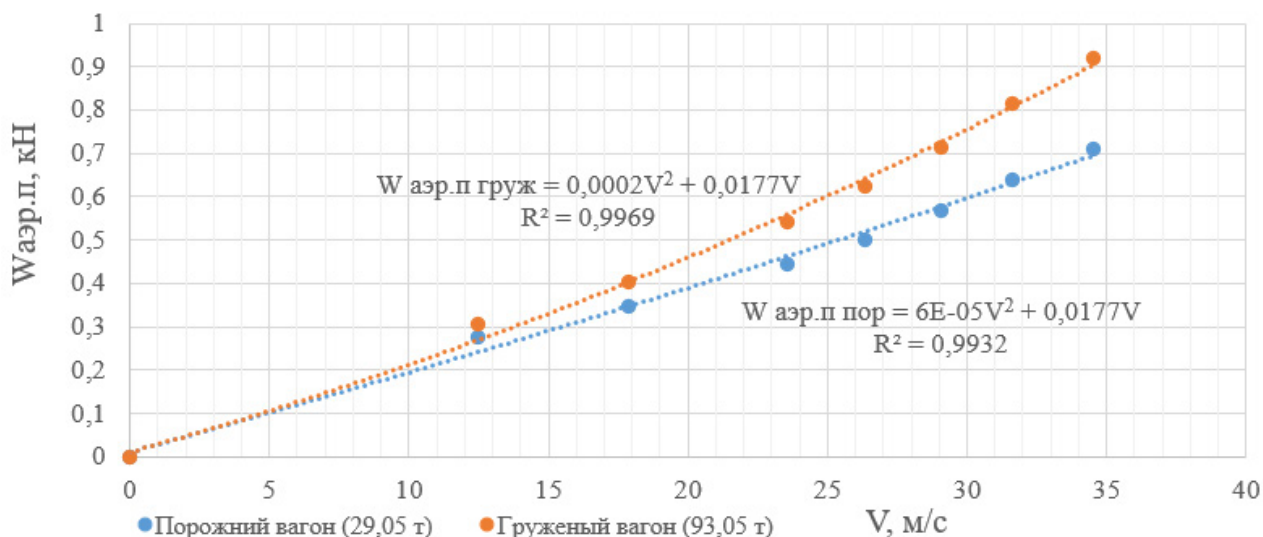
**Рис. 10.** Результаты расчета аэродинамической составляющей основного сопротивления движению порожнего одиночного исследуемого вагона при скорости движения 130 км/ч

Затем по формулам (11) и (12) было определено полное аэродинамическое сопротивление одиночного исследуемого вагона  $W_{\text{аэр.0}}$  и вагона в составе поезда  $W_{\text{аэр.п.}}$ .

Графики зависимости полного аэродинамического сопротивления одиночного исследуемого вагона и в составе поезда от скорости его движения представлены на рис. 11 и 12 соответственно.



**Рис. 11.** Графики зависимости полного аэродинамического сопротивления одиночного исследуемого вагона от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях



**Рис. 12.** Графики зависимости полного аэродинамического сопротивления исследуемого вагона в составе поезда от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

Результаты расчета полного аэродинамического сопротивления одиночного вагона  $w_{\text{аэр.0}}$  и вагона в составе поезда  $w_{\text{аэр.п}}$ , основного сопротивления движению одиночного вагона определенной экспериментально  $w_{k0}$ , основного сопротивления движению вагона в составе поезда  $w_k$  в груженом и порожнем режимах загрузки, пересчитанные для средних скоростей движения вагона в режиме выбега, представлены в табл. 3.

**ТАБЛИЦА 3.** Результаты расчета основного сопротивления движению вагона в составе поезда, определенного экспериментально с применением цифровых моделей

Порожний режим								
$w_p$ , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	27,8	44,9	64,4	84,8	94,8	104,6	113,9	124,3
$w_{\text{аэр.0}}$	0,39	1,08	2,00	3,32	4,16	4,93	5,74	6,53
$w_{\text{аэр.п}}$	0,23	0,28	0,35	0,44	0,50	0,57	0,64	0,71
$w_{k0}$	0,55	1,36	2,42	4,00	5,01	5,96	6,85	7,85
$w_k$	0,39	0,55	0,77	1,12	1,35	1,60	1,74	2,04
Груженный режим								
$w_p$ , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	24,7	44,2	64,5	85,0	94,7	105,0	114,8	125,0
$w_{\text{аэр.0}}$	0,33	0,94	1,81	2,58	3,74	4,33	5,43	6,61

Окончание ТАБЛИЦЫ 3

$w_{\text{аэр.л}}$	0,24	0,30	0,40	0,54	0,62	0,71	0,81	0,92
$w_{k0}$	0,83	1,56	2,62	3,49	4,78	5,55	6,79	8,14
$w_k$	0,75	0,93	1,22	1,45	1,66	1,94	2,17	2,45

Дополнительно основное сопротивление движению исследуемого вагона в составе поезда определялось по формуле правил тяговых расчетов для поездной работы (ПТР) [15]:

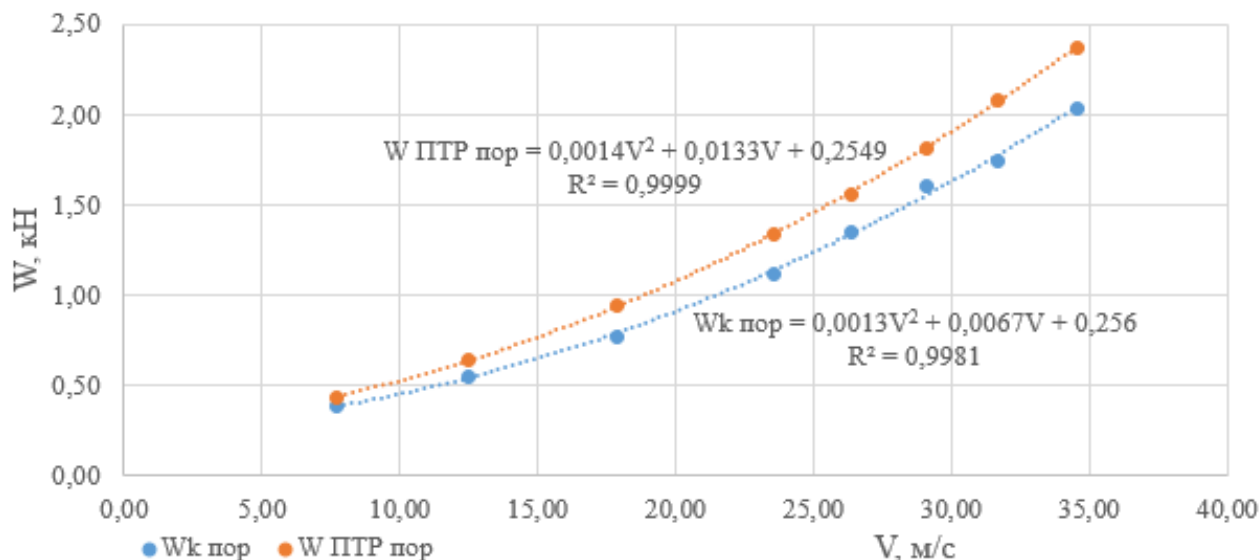
$$w_{\text{ПТР}} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785v + 0,027v^2}{q_0}, \quad (16)$$

где  $q_0$  — нагрузка на ось.

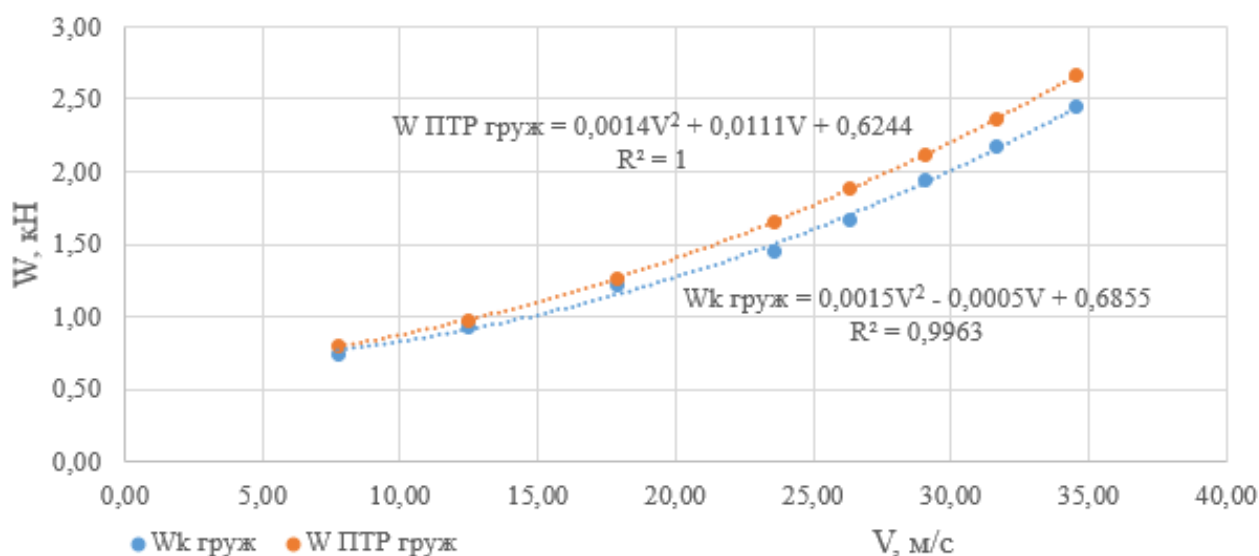
Результаты расчета основного удельного сопротивления движению исследуемого вагона в составе поезда в соответствии с формулой, представленной в ПТР, и в соответствии с проведенным экспериментом с применением цифровых моделей  $w_k$  представлены в табл. 4 и на рис. 13 и 14.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение результатов расчета основного сопротивления движению исследуемого вагона в соответствии с проведенным экспериментом с применением цифровых моделей и с ПТР

Порожний режим								
$w_i$ , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	27,8	44,9	64,4	84,8	94,8	104,6	113,9	124,3
$w_k$	0,39	0,55	0,77	1,12	1,35	1,60	1,74	2,04
$w_{\text{ПТР}}$	0,44	0,64	0,94	1,34	1,56	1,81	2,08	2,37
Относительная разность, %	11	14	18	17	14	12	16	14
Груженный режим								
$w_i$ , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	24,7	44,2	64,5	85,0	94,7	105,0	114,8	125,0
$w_k$	0,75	0,93	1,22	1,45	1,66	1,94	2,17	2,45
$w_{\text{ПТР}}$	0,79	0,98	1,27	1,66	1,88	2,12	2,36	2,66
Относительная разность, %	6	5	4	12	12	9	8	8



**Рис. 13.** Графики зависимости основного сопротивления движению исследуемого вагона в соответствии с ПТР и проведенным экспериментом с применением цифровых моделей от скорости движения в порожнем состоянии



**Рис. 14.** Графики зависимости основного сопротивления движению исследуемого вагона в соответствии с ПТР и проведенным экспериментом с применением цифровых моделей от скорости движения в груженом состоянии

## Выводы

1. Полученные в 60-х годах прошлого века коэффициенты в выражении для определения основного сопротивления движению грузовых вагонов, представленные в правилах тяговых расчетов для поездной работы, устарели и на сегодняшний день требуют актуализации. Используемые в ПТР формулы завышают

основное сопротивление движению для полувагона модели 12-1293-03 в диапазоне скоростей 60–130 км/ч на 17–18 %.

2. Предложена методика определения основного сопротивления движению вагона при проведении ходовых тормозных испытаний, заключающаяся в измерении замедления исследуемого вагона за период уменьшения скорости его движения на 10 км/ч до включения тормоза с учетом посекундной регистрации его положения и сопоставления зарегистрированных координат с мгновенной величиной уклона пути, что позволяет существенно повысить точность измерений.

3. Разработанная методика испытаний по определению основного сопротивления движению грузовых вагонов при проведении ходовых тормозных испытаний позволяет повысить точность и существенно сократить расходы на испытания. Методика рекомендуется к использованию для определения основного сопротивления движению вагонов и оценки их энергоэффективности.

### Список источников

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В. А. Гапанович [и др.]; под ред. В. А. Гапановича. М.: Изд. дом МИСиС, 2012. 620 с.

2. Об энергосбережении и о повышении энергетической энергоэффективности: федер. закон от 23.11.2009 № 261.

3. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года. М., 2022.

4. Оценка энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения / Т. С. Титова [и др.] // Известия ПГУПС. 2017. Вып. 1. С. 119–127.

5. Виноградова С. А., Попов К. М. Цифровые технологии повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 42–45.

6. Комарова А. Н., Бороненко Ю. П. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 3 (52). С. 69–72.

7. Захаров А. Н., Ромен Ю. С., Певзнер В. О. Оценка сопротивления движению грузовых вагонов в зависимости от положения осей колесных пар в тележках и состояния пути // Вестник ВНИИЖТ. 1996. № 2. С. 33–36.

8. Соколов А. М., Орлова А. М. Осевая нагрузка 27 тс — новая веха развития вагоностроения // Вагоны и вагонное хозяйство. 2016. № 3 (47). С. 5–7.

9. Астахов П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава. М.: Транспорт, 1966. 176 с.

10. Бороненко Ю. П., Поляков Б. О., Белгородцева Т. М. Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2021. № 1–2 (92–93). С. 57–62.

11. Чурков Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда. Принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на поезд. М.: Желдориздат, 2006. 331 с.

12. Методика определения сопротивления движению поезда в выполненной поездке по данным электронного регистратора параметров движения / А. В. Климович [и др.] // Известия Транссиба. 2010. № 3. С. 16–25.

13. Крон И. Р., Поляков Б. О. Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению подвижного состава с применением цифровых моделей // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2021. № 4 (95). С. 50–53.

14. Крон И. Р. Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению грузовых вагонов с применением цифровых моделей: специальность: дисс. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВО ПГУПС. СПб., 2023. 136 с.

15. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.

Дата поступления: 13.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

#### **Контактная информация:**

БОРОНЕНКО Юрий Павлович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»; boron49@yandex.ru

КОМАЙДАНОВ Алексей Андреевич — аспирант, ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; komaidanovnvc@yandex.ru.

## **Method for determining the primary obstacle to motion of freight wagons during running brake tests**

**Yu. P. Boronenko, A. A. Komaidanov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Boronenko Yu. P., Komaidanov A. A. Method for determining the primary obstacle to motion of freight wagons during running brake tests // Bulletin of scientific research results. 2026, iss. 1, pp. 154–173. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-154-173. (In Russian)*

#### **Abstract**

**Objective:** to develop an advanced method for determining the primary resistance to motion of freight wagons during running brake tests, aimed at enhancing measurement accuracy and reducing test costs.

**Methods:** the primary resistance to the motion of a single wagon was determined experimentally, while

the aerodynamic component of a single wagon and that within a train was calculated using digital models. **Results:** a methodology for determining the primary resistance to the movement of freight wagons during running braking tests has been developed and validated, which allows for a significant reduction in test costs. **Practical significance:** the study will enable a significant decrease in the expenses involved in evaluating resistance to motion. At the same time, the proposed approach will increase the precision of measurements by removing a number of errors. The developed method may be applied during the acceptance trials of newly manufactured railway wagons. Its use allows for more accurate estimation of basic running resistance, which, in turn, will support a more reliable assessment of their energy performance.

**Keywords:** freight wagon, resistance to movement, energy efficiency of the wagon, running brake tests

## References

1. Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik dlya vuzov / V.A. Gapanovich [i dr.]; pod red. V.A. Gapanovicha. M.: Izd. dom MISiS, 2012. 620 s. (In Russian)
2. Ob energoberezhenii i o povyshenii energeticheskoy energoeffektivnosti: feder. zakon ot 23.11.2009 no. 261. (In Russian)
3. Energeticheskaya strategiya OAO "RZHD" na period do 2030 goda i na perspektivu do 2035 goda. M., 2022. (In Russian)
4. Ocenka energoeffektivnosti raboty zheleznodorozhnogo transporta primeneniem specializirovannykh udel'nykh edinic izmereniya / T.S. Titova [i dr.] // Izvestiya PGUPS. 2017. Vyp. 1. S. 119–127. (In Russian)
5. Vinogradova S.A., Popov K.M. Cifrovye tekhnologii povysheniya energeticheskoy effektivnosti zheleznodorozhnykh perevozok // Zheleznodorozhnyy transport. 2019. No. 7. S. 42–45. (In Russian)
6. Komarova A.N., Boronenko Yu.P. Sravnitel'naya ocenka soprotivleniya dvizheniyu gruzovykh vagonov na telezhkakh razlichnykh tipov // Transport Rossijskoj Federacii. 2014. No. 3 (52). S. 69–72. (In Russian)
7. Zaharov A.N., Romen Yu.S., Pevzner V.O. Ocenka soprotivleniya dvizheniyu gruzovykh vagonov v zavisimosti ot polozheniya osey kolesnykh par v telezhkakh i sostoyaniya puti // Vestnik VNIIZHT. 1996. No. 2. S. 33–36. (In Russian)
8. Sokolov A.M., Orlova A.M. Osevaya nagruzka 27 ts — novaya vekha razvitiya vagonostroeniya // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. 2016. No. 3 (47). S. 5–7. (In Russian)
9. Astahov P.N. Soprotivlenie dvizheniyu zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. M.: Transport, 1966. 176 s. (In Russian)
10. Boronenko Yu.P., Polyakov B.O., Belgorodceva T.M. Opredelenie aerodinamicheskogo soprotivleniya gruzovykh poezdov s innovacionnymi poluvagonami na cifrovyykh modelyakh // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2021. No. 1–2 (92–93). S. 57–62. (In Russian)
11. Churkov N.A. Aerodinamika zheleznodorozhnogo poezda. Principy konstruirovaniya podvizhnogo sostava, minimiziruyushchie vozdejstviya vozduшной sredy na poezd. M.: Zheldorizdat, 2006. 331 s. (In Russian)

12. Metodika opredeleniya soprotivleniya dvizheniyu poezda v vypolnennoj poezdke po dan-nyim elektronnoho registratora parametrov dvizheniya / A. V. Klimovich [i dr.] // Izvestiya Transsiba. 2010. No. 3. S. 16–25. (In Russian)

13. Kron I. R., Polyakov B. O. Raschetno-eksperimental'nyj metod opredeleniya osnovno-go soprotivleniya dvizheniyu podvizhnogo sostava s primeneniem cifrovyh modelej // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2021. No. 4 (95). S. 50–53. (In Russian)

14. Kron I. R. Raschetno-eksperimental'nyj metod opredeleniya osnovnogo soprotivleniya dvizheniyu gruzovyh vagonov s primeneniem cifrovyh modelej: special'nost': diss. ... kand. tekhn. nauk / FGBOU VO PGUPS. SPb., 2023. 136 s. (In Russian)

15. Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty: utv. rasporyazheniem OAO “RZHD” ot 12.05.2016 No. 867r. (In Russian)

Received: 13.02.2026

Accepted: 04.03.2026

**Author’s information:**

Yuri P. BORONENKO — D. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department of “Wagons and Wagon Facilities”; boron49@yandex.ru

Aleksey A. KOMAIDANOV — Postgraduate Student, Teaching Assistant of the Department of “Wagons and Wagon Facilities”; komaidanovnc@yandex.ru