Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению подвижного состава с применением цифровых моделей

И. Р. Крон,
инженер-испытатель АО «НВЦ „Вагоны“», аспирант ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС)

Б. О. Поляков,
инженер-испытатель II категории АО «НВЦ „Вагоны“», аспирант ПГУПС

На основании анализа существующих эмпирических и теоретических методов определения основного удельного сопротивления движению подвижного состава установлено, что его теоретическое определение не обладает достаточной точностью, а экспериментальное отличается высокой стоимостью проведения. Полученные результаты послужили обоснованием для разработки нового метода определения указанного параметра.

Определение величины основного удельного сопротивления движению железнодорожного подвижного состава с позиций энергетики и экономики является одной из важных задач при конструировании и введении в эксплуатацию нового подвижного состава. Возникновение идеи необходимости определения силы, препятствующей силе тяги, и последующие эксперименты, проводимые с целью ее уточнения, в совокупности заложили теоретическую базу и способствовали созданию различных методик, формул и закономерностей для теоретического определения данной величины.

Теоретические методы

Толчком к созданию теоретической базы и эмпирического фундамента стало предложение французского инженера Жюля Дюпюи в 1837 г. использовать формулу для определения силы трения качения, в которой он отразил обратную пропорциональную зависимость этой силы от радиуса тела качения **[1]**. Дальнейшие исследования в области энергетики движения подвижного состава велись параллельно отечественными и зарубежными учеными, исследователями и инженерами. Так, русский инженер путей сообщения В. И. Лопушинский одним из первых провел значительные опыты по определению основного сопротивления и отразил их в соответствующих аналитических закономерностях.

Далее последовали труды других выдающихся отечественных ученых, среди которых Н. П. Петров, еще в 1889 г. создавший труд «Сопротивление поезда на железной дороге», где были сформулированы составляющие основного сопротивления, которые лишь немного видоизменились к настоящему времени. Далее русский инженер-железнодорожник Ю. В. Ломоносов в своем главном труде — прототипе современных «Тяговых расчетов для поездной работы» **[2; 3]** — провел жесткую дифференциацию воздушного сопротивления на его составляющие, и выяснил, что аэродинамическое сопротивление движению определяется лишь квадратом скорости движения подвижного состава. Ученый также установил зависимость основного сопротивления движению от загруженности вагонов, климатических условий, состояния пути, силы и направления ветра.

Рис. 1. Цифровая модель полувагона 12–6877–02, созданная в среде SolidWorks

Поистине же фундаментальным и собирательным трудом по данной теме следует считать работу П. Н. Астахова **[4]**. Ученый обозначил основные методы определения составляющих удельного сопротивления движению и создал актуальную классификацию последних, представленную ниже.

Сопротивление от трения шеек осей в подшипниках. В настоящее время на подвижном составе преимущественно используются роликовые подшипники качения, ввиду их низкого относительно подшипников скольжения коэффициента трения. Однако в настоящее время все чаще, по обоснованным причинам **[5]**, речь заходит о применении конических подшипников кассетного типа, для которых значение коэффициента сопротивления еще предстоит выяснить.

Сопротивление трения качения в системе «колесо — рельс», зависящее от твердости материалов в месте контакта и, как следствие, площади пятна контакта.

Сопротивление трения скольжения в системе «колесо — рельс». Величина этой составляющей во многом зависит от правильности установки колес на ось, наличия дефектов колеса и т. д.

Сопротивление от рассеяния энергии, зависящее от конструкции и состояния пути и впервые обнаруженное проф. Б. Н. Веденисовым. Это явление обусловлено не абсолютно жестким креплением элементов пути и, как следствие, их хоть и достаточно малыми, но перемещениями. Эти перемещения вызваны движением подвижного состава и силами трения, в ходе работы которых кинетическая энергия поезда расходуется на нагрев конструкции путевого полотна.

Сопротивление воздушной среды, которое для более точного учета следует дифференцировать на составляющие сопротивления лобовой, хвостовой частей, межвагонного, подвагонного пространств и т. д. Помимо этого, аэродинамическую составляющую сопротивления движения принято также классифицировать на сопротивления формы и трения **[6]**.

Сопротивление, вызванное рассеиванием энергии в окружающую среду. Данная составляющая возникает во время движения в процессе различных колебаний подвижного состава и его узлов, имеющих упругие связи.

За рубежом также проводились теоретические исследования, многие из которых базируются на эмпирических закономерностях. Среди исследователей выделяются следующие: Штраль, Заутхофф (Германия), разработавшие собственные формулы для определения сопротивления движению пассажирских и грузопассажирских поездов; Д.-С. Армстронг, П.-Г. Свифт (Великобритания), определившие физический смысл коэффициентов формулы Дэвиса; Т. Маэда (Япония), уделявший большое внимание влиянию аэродинамики поезда на его энергетические свойства **[1]**.

При этом наиболее ярким представителем зарубежных ученых, внесших огромный вклад в энергетику движения подвижного состава, является У. Дж. Дэвис, формулу которого многие исследователи на основании опытных зависимостей применяют и видоизменяют по сей день:

$$\omega = A + Bv + Cv^2.$$

Однако, существующие и используемые в настоящее время формулы **[1; 2]**, как показывают исследования **[7]** обладают существенными погрешностями. Ввиду этого целесообразно разработать новую методику определения основного удельного сопротивления движению.

Эмпирические методы

Экспериментальное определение основного удельного сопротивления движению подвижного состава представляют динамометрический метод, метод скатывания (суть которых подробно описана в **[4]**), а также метод энергетического баланса.

При этом на последний следует обратить особое внимание. Его суть заключается в отыскании слагаемого, представляющего собой величину основного сопротивления движению посредством алгебраической разности всех составляющих величин, потребленной подвижным составом энергии и полученной от источника питания. Так, например, для электрического подвижного состава **[8]**:

$$A = A_{\text{пп}} + A_{\omega_0} + A_{\text{кр},i} + \\ + A_{\text{пт}} + A_{\text{т}} + A_{\text{тд}} + A_{\text{сн}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{пп}}$ — потери энергии на пусковые усилия;

$A_{\omega 0}$ — потери энергии, необходимые для преодоления основного сопротивления движению;

$A_{\text{кр, i}}$ — изменения энергии, возникающие во время прохождения кривых и уклонов;

$A_{\text{пт}}$ и $A_{\text{т}}$ — расход энергии соответственно на подтормаживание и торможение;

$A_{\text{тд}}$ — потребление энергии, необходимое для покрытия потерь в тяговых двигателях;

$A_{\text{сн}}$ — потребление энергии, расходуемой на собственные нужды подвижного состава (вентиляцию, отопление, освещение и т. д.).

Для вычисления общего сопротивления преобразуем (1):

$$A_{\omega_0} + A_{\text{кр},i} = \\ = A - (A_{\text{пп}} + A_{\text{пт}} + A_{\text{т}} + A_{\text{тд}} + A_{\text{сн}}). \quad (2)$$

Стоит отметить, что каждая из представленных величин в правой части выражения (2) являет собой значение, полученное при помощи метода косвенных измерений, а значит, имеет некоторую погрешность. Запишем (2) в виде алгебраической суммы ошибок:

$$\Delta(A_{\omega_0} + A_{\text{кр},i}) = \\ = \Delta A + \Delta A_{\text{пп}} + \Delta A_{\text{пт}} + \Delta A_{\text{т}} + \Delta A_{\text{тд}} + \Delta A_{\text{сн}} \quad (3)$$

Таким образом, с учетом (3) запишем величину общего сопротивления движению:

$$A_{\omega_0} + A_{\text{кр},i} \pm \Delta(A_{\omega_0} + A_{\text{кр},i}).$$

Очевидно, что существует некоторая вероятность того, что все величины, входящие в правую часть (3), могут принять либо максимальные положительные, либо минимальные отрицательные значения. Таким образом, их алгебраическая сумма может привнести существенную ошибку в величину общего или, в частном случае, основного сопротивления движению **[9]**.

Следовательно, при помощи метода энергетического баланса целесообразно производить лишь качественную оценку величины общего сопротивления движению подвижного состава.

Достоинства и недостатки каждого из методов кратко представлены в *таблице*.

Таблица. Достоинства и недостатки методов опытного определения сопротивления движению

Метод	Достоинства	Недостатки
Динамометрический	Отсутствие необходимости специальных опытных рейсов	Невозможность исследования сопротивления локомотивов, учета лобового сопротивления от воздуха, большие финансовые затраты
Скатывания	Универсальность в отношении видов подвижного состава	Высокие требования к испытательному оборудованию
Энергетического баланса	Относительная простота метода	Широкая область среднеквадратического отклонения из-за метода подсчета

Цифровые методы

Ввиду ускоренных темпов цифровизации постиндустриального общества решение инженерных задач все больше делегируется компьютерным технологиям. Определение основного удельного сопротивления не является исключением.

В зависимости от постановки задачи и цели исследования применяются различные среды автоматизированного проектирования: OpenFOAM, SolidWorks, Ansys, Medyna. Проведение в них цифровых опытов позволяет с легкостью учитывать геометрическое, аэродинамическое и физическое подобия и получать результаты при минимальных финансовых вложениях. Однако анализ отечественной и зарубежной современной литературы показал, что ввиду развития высокоскоростного движения пассажирского подвижного состава наибольшее внимание уделяется аэродинамической составляющей, которая, как было отмечено, возрастает пропорционально квадрату скорости.

Проведение цифровых экспериментов все-таки не следует считать исключительным в смысле их точности. Исследователь, проектирующий подобный эксперимент, должен быть максимально уверен в адекватности построенной им модели и условиях проведения опыта.

Имея в виду вышесказанное, можно говорить о наличии объективной необходимости в создании нового метода определения основного сопротивления движению подвижного состава.

Расчетно-экспериментальный метод

Предлагаемый метод основывается на уравнении замедленного движения отцепленного от локомотива вагона на известном участке пути:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + F_{\text{сопр}} + F_{\text{укл}} = 0, \qquad (4)$$

где m — масса вагона с учетом инерции вращения колесных пар;

$F_{\text{сопр}}$ — сила сопротивления движению;

$F_{\text{укл}}$ — сила сопротивления от уклона.

При этом силу сопротивления движению следует представлять в виде составляющих, которые являют собой силу механического сопротивления движению, а также три величины аэродинамического сопротивления, характерные для лобовой $F_{\text{лоб}}$, хвостовой части $F_{\text{хвост}}$ и сопротивления от ветра $F_{\text{ветр}}$

$$F_{\text{сопр.}} = F_0 + F_{\text{ветр}} + F_{\text{лоб}} + F_{\text{хвост}}. \qquad (5)$$

Сила сопротивления, зависящая от уклона, определяется геодезической съемкой и профилем пути в соответствии с (6):

$$F_{\text{укл}} = mg\frac{\partial z}{\partial x},\ z = f(x). \qquad (6)$$

При этом координата x определяется по GPS-ГЛОНАСС-навигатору. Таким образом, сила основного сопротивления движению

$$F_{\text{о}} = -m\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - F_{\text{ветр}} - F_{\text{лоб}} - F_{\text{хвост}} - F_{\text{укл}} \qquad (7)$$

Замедление вагона определяется первым слагаемым уравнения (7) по уменьшению скорости отцепленного вагона в определенные промежутки времени.

Силу ветра, а также его направления возможно определять при помощи комбинации расчетных цифровых и экспериментальных методов. При этом ее величина является функцией от угла равнодействующей силы ветра, определяемой по датчику с флюгером, и относительной скорости воздуха (8), значение которой можно получить по показаниям датчика, установленного на внешней части кузова вагона (9). Формально

$$F_{\text{ветр}} = f(v, \alpha), \qquad (8)$$

Лобовое $F_{\text{лоб}}$ и хвостовое $F_{\text{хвост}}$ сопротивления определяются исключительно расчетным методом с применением цифровой модели. Следует отметить, что определение этих величин обусловлено издержками самих испытаний. Поскольку основной целью предлагаемого метода является определение величины основного сопротивления движению вагона в составе поезда, то составляющие $F_{\text{лоб}}$ и $F_{\text{хвост}}$ получаемые в ходе испытания непосредственно, необходимо вычитать из получаемой по (5) $F_{\text{сопр}}$. В будущем помимо данных составляющих необходимо также предусмотреть выявление и определение аэродинамического сопротивления от межвагонных пространств, которое следует вычитать из общей величины $F_{\text{сопр}}$ подобно $F_{\text{лоб}}$ и $F_{\text{хвост}}$.

Таким образом, для экспериментальной части метода возможно проведение испытаний в двух вариациях:

$$v_{\text{ветр}} = v_{\text{датчика}} - v_{\text{вагона}}.$$

• при наличии длинного прямого участка — броском вагона до его остановки;

• последовательными бросками вагона со скоростью от 90 до 10 км/ч с шагом –10 км/ч одновременно с тормозными испытаниями с использованием задержки срабатывания тормоза с помощью специального датчика на 10–60 с в зависимости от длины имеющегося прямого участка.

Отличительной чертой проводимых бросковых испытаний помимо описанного выше является наличие специального электропневматического реле с задержкой по времени. Устройство устанавливается на тормозной магистрали испытуемого вагона и работает по принципу клапана. То есть при расцепе вагона-лаборатории с испытуемым образцом устройство приходит в действие за счет возникающей разности давлений и перекрывает сообщение тормозной магистрали вагона с окружающей средой. Программируемый датчик, осуществляющий задержку по времени, в момент расцепа начинает отсчет заданной задержки в секундах в обратном порядке.

По истечению времени на вход электропневматического реле при помощи установленной в устройстве аккумуляторной батареи будет подана логическая единица. Этот сигнал прекратит работу реле в качестве клапана и тормоза на опытном образце придут в действие. Применение данного устройства обусловлено необходимостью практического соответствия ускорения движущегося вагона в составе поезда с постоянной скоростью.

Определение аэродинамических параметров испытуемого вагона проводится поэтапно с применением электронно-вычислительной техники. Первым этапом является проектирование и моделирование вагона в цифровой среде с соблюдением особенностей опытного образца для достижения наилучшей адекватности модели. В процессе моделирования необходимо особое внимание уделять геометрическому и аэродинамическому подобию разрабатываемой модели и опытного образца. При моделировании вагона допускается эквивалентная замена некоторых конструкционных элементов на упрощенные, если они существенно не влияют на конечный результат расчета. Создание цифровой модели испытуемого вагона следует производить в среде SolidWorks или аналогичной.

Примером подобной модели может быть полувагон 12–6877–02, представленный на *рис. 1*.

Аэродинамический расчет следует производить в программном комплексе ANSYS Workbench с использованием модуля Fluent. Проведение расчета необходимо выполнять в условиях, приближенных к тем, при которых производились испытания опытного образца вагона. То есть бросковым испытаниям в порожнем режиме должны соответствовать расчеты

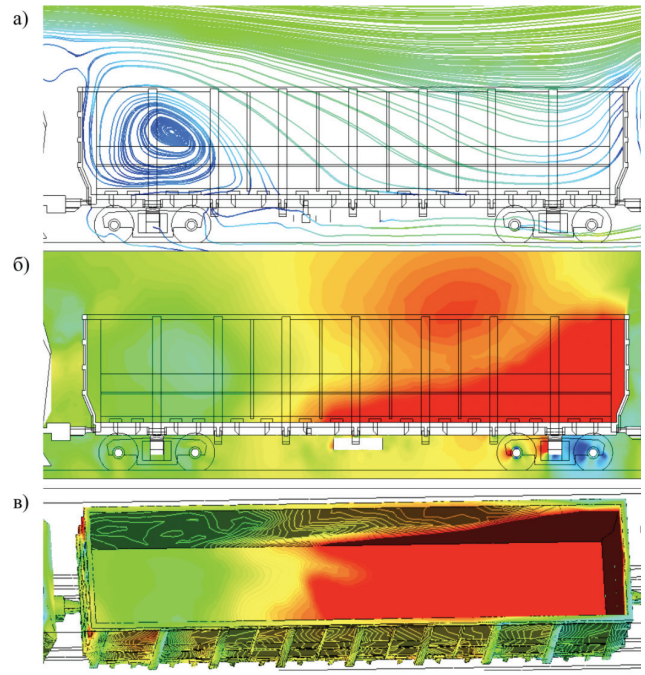

Рис. 2. Состояние воздушной среды вблизи порожнего вагона модели 12–9548–02. а — траектории воздушных потоков в сечении; б — эпюра давления воздуха в сечении; в — эпюра давления на поверхностях модели вагона

при отсутствии имитации груза в полости цифровой модели вагона, а груженому режиму — модели с имитацией реального груза, которым может выступать объемное тело заданной массы и геометрии **[10]**.

Проведение цифровых расчетов с применением специального алгоритма SIMPLE, учитывающего взаимную зависимость скорости воздушного потока и его давления, и большим числом итераций позволит с высокой точностью определить величины аэродинамического сопротивления в любой точке объема рассчитываемой модели, направления векторов скоростей дифференцированных воздушных потоков, а также картину распределения давления на отдельных поверхностях вагона. Осуществление подобных расчетов проиллюстрировано *рис. 2*.

При обработке результатов исследования отдельное внимание стоит обращать на характер воздушных потоков, вычленять и давать верную оценку влиянию турбулентных завихрений и ламинарному течению воздушной среды. Для корректного воспроизведения реального, окружающего испытуемый образец воздуха необходимо осознанно подходить к выбору входных параметров. Например, для смоделированного образца на *рис. 2* была выбрана модель турбулентности Transition SST, а также плотность воздуха, равная 1,225 кг/м^3, температура воздушной среды 15 °С и ее вязкость 1,7894 · 10–5 кг/м/с **[11]**.

Поскольку опыт производится на основе аэродинамического подобия, то есть при движении воздушной среды относительно покоящейся модели испытуемого вагона, необходимо элементам модели присвоить значение неподвижной стенки, а для воздушного потока задать сечение, перпендикулярное оси эквивалентного движения вагона, входа и выхода, иными словами, задать границы и условия на границах расчетной области. Таким образом, будет произведена виртуальная продувка опытного образца.

Обработка результатов должна производиться визуальной оценкой картин распределения давления и направлений векторов скоростей воздушного потока, а также анализом полученных числовых значений, которые следует приводить к их среднему с учетом стандартного отклонения.

Анализ применяемых в настоящее время методов определения основного сопротивления движению подвижного состава позволяет сделать вывод о том, что эмпирические и теоретические закономерности, являющиеся основой для энергетического расчета движения, морально устарели ввиду разработок и внедрения инновационного подвижного состава. Из сказанного следует, что существует объективная необходимость в реализации нового синтетико-гибридного метода, описанного выше и основанного на комплексе натурных испытаний и опытов с применением компьютерных технологий. Т

Литература

1. Rochard, B. P. A review of methods to measure and calculate train resistances / B. P. Rochard, F. Schmid // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers part F: Journal Of Rail And Rapid Transit. — 2000. — Vol. 214. — № 4. — P. 185–199.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Электронный ресурс]: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 867р от 12 мая 2016 г. — URL: ftp://09272071.com/docs/ПТР-2016.pdf (дата обращения: 21.03.2021).
3. Ломоносов, Ю. В. Тяговые расчеты и приложение к ним графических методов / Ю. В. Ломоносов. — Санкт-Петербург : Типография Министерства путей сообщения (т-ва И. Н. Кушнерев и К°), 1912. — 100 с.
4. Астахов, П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава: труды ЦНИИ МПС. — Москва : Транспорт, 1966. — 178 с.
5. Стоянова, Н. В. Актуальность применения в современных вагонах более надежных узлов и деталей // Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения: Материалы Международной научно-практической конференции. — Воронеж, 2015. — С. 78–81.
6. Чурков, Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда. — Москва : Желдориздат, 2007. — 332 с.
7. Климович, А. В. Методика определения сопротивления движению поезда в выполненной поездке по данным электронного регистратора параметров движения / А. В. Климович, А. А. Кообар, А. С. Лендясов // Известия Транссиба. — 2010. — № 3. — С. 16–25.
8. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров [и др.]. — Москва : Транспорт, 1995. — 294 с.
9. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок. — Москва : Мир, 1985. — 272 с.
10. Poliakov, B. O. Determination of Aerodynamic Drag of a Train Consisting of Gondola Cars / B. O. Poliakov, Iu. P. Boronenko // Proceedings of 26th Symposium of the International Association of Vehicle System Dynamics (IAVSD), Gothenburg, Sweden. — 2020. — P. 491–496. doi: 10.1007/978–3–030–38077–9_58
11. Бороненко, Ю. П. Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 4. — С. 62–78.