

ми. При этом частота колебаний оборудования примерно равна среднему арифметическому значению верхней и нижней частоты. Это условие можно считать критерием перехода с верхней ЧСИК на нижнюю.

Таким образом, для повышения ЧСИК брутто со значения 7,51 Гц при жестком креплении оборудования до нормативного значения в 8 Гц и выше необходимо ввести податливые крепления оборудования исходя из расчета частоты колебаний оборудования 6–6,5 Гц.

При этом ЧСИК удастся увеличить на 9–11 %. Амплитуды колебаний на нижней частоте в этом случае будут как минимум в 2,3 раза меньше, чем на верхней. Положительное влияние податливости креплений на показатели плавности хода и уровни виброускорений нуждается в экспериментальном подтверждении.

В некоторых нормативных документах регламентируется также значение ЧСИК для тары кузова, которое не должно быть менее 10 Гц. Применение податливых креплений оборудования исходя из частоты его колебаний 6–6,5 Гц позволяет в данном случае повысить значение ЧСИК при любой населенности вагона. В частности, для тары кузова ЧСИК может быть повышена не менее чем до 11 Гц, что позволяет удовлетворить нормативным требованиям. С применением жестких опор значение ЧСИК составляет 9,78 Гц.

Значение частоты собственных колебаний оборудования для эффективного увеличения ЧСИК должно быть меньше значения ЧСИК с оборудованием при любой населенности. Для кузова брутто вагона городского электропоезда рассматриваемой конструкции применение упругих креплений позволяет повысить ЧСИК на 9–11 %.

Частота колебаний оборудования, при которой происходит смена преобладающей ЧСИК с верхней на нижнюю, увеличивается с сокращением населенности. Таким образом, основным расчетным режимом для назначения жесткости креплений является случай максимальной населенности.

Использование упругих креплений крышевого оборудования влияет на ЧСИК аналогично подвагонному оборудованию, при этом степень влияния пропорциональна относительной массе оборудования.

#### Список литературы

1 ГОСТ 33796-2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2017-04-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 35 с.

2 Гучинский, Р. В. Оптимизация конструкции кузова вагона электропоезда по значению частоты собственных колебаний / Р. В. Гучинский // Вестник ВНИИЖТ. – 2021. – Т. 80, № 3. – С. 152–159.

3 Гучинский, Р. В. Расчет частоты собственных изгибных колебаний кузова вагона электропоезда с учетом податливости опор / Р. В. Гучинский // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 4–11.

УДК 533.6.011:004.94

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*О. В. ДЕМЬЯНЧУК*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время при определении основного сопротивления движению вагонов используются коэффициенты, определенные укрупненно для отдельных типов вагонов и установленные Правилами тяговых расчетов. С другой стороны, постоянно создаются новые модели вагонов, аэродинамические характеристики которых могут существенно отличаться от усредненных [1].

Для получения значений аэродинамических нагрузок на транспортные средства используются полномасштабные испытания, эксперименты в аэродинамической трубе, методы аналитического расчета и компьютерное моделирование. Проведение полномасштабных испытаний является сложным и дорогостоящим процессом. Данные, полученные по результатам испытаний в аэродинамической трубе, требуют последующей обработки для обеспечения соответствия полномасштабным транспортным средствам. Проведение исследований с помощью технологий трехмерного моделирования Computational Fluid Dynamics (CFD) является одним из наиболее перспективных подходов. Преимущество данного метода заключается в том, что можно рассчитать и визуализировать схемы потока и коэффициенты сопротивления, а это позволяет отказаться от дорогостоящих испытаний [2, 3].

В программном комплексе ANSYS CFX выполнено моделирование обтекания воздушным потоком упрощенной модели железнодорожного вагона, представляющей прямоугольный параллелепипед, при различных углах атаки воздушного потока (рисунок 1). При построении расчетной сетки использован метод «Hex Dominant Method». Данный метод позволит строить сетки на основе элементов-гексаэдров. При моделировании использованы параметры сетки и граничные условия, установленные в ранее выполненных работах [4, 5].

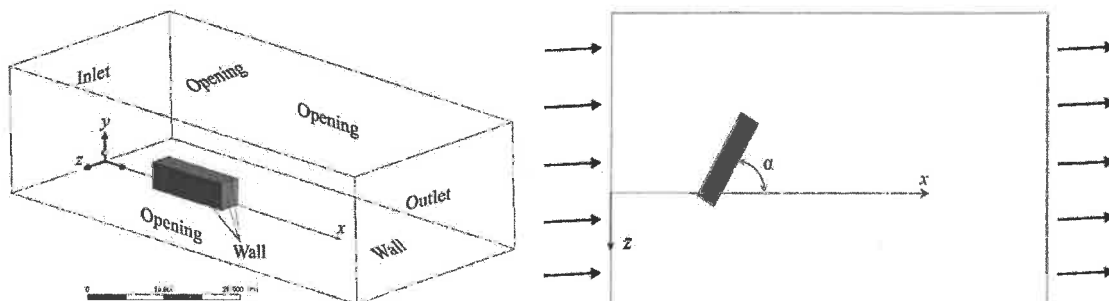


Рисунок 1 – Расчетная область разработанной компьютерной модели

Численное моделирование выполнялось на основе решения уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, для замыкания которых используется модель турбулентности  $k-\epsilon$ . Данная модель представляет собой систему двух дифференциальных уравнений относительно кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости диссипации кинетической энергии  $\epsilon$ .

По результатам моделирования получены картины распределения скоростей частиц потока в расчетной области и давлений на поверхности вагона. На основе полученных значений сил, действующих вдоль железнодорожного пути на вагон, определены значения коэффициента аэродинамического сопротивления для угла атаки в диапазоне от 0 до 90°.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей аэродинамического коэффициента от угла атаки воздушного потока, полученные по результатам компьютерного моделирования и натурных испытаний крытого вагона [6].

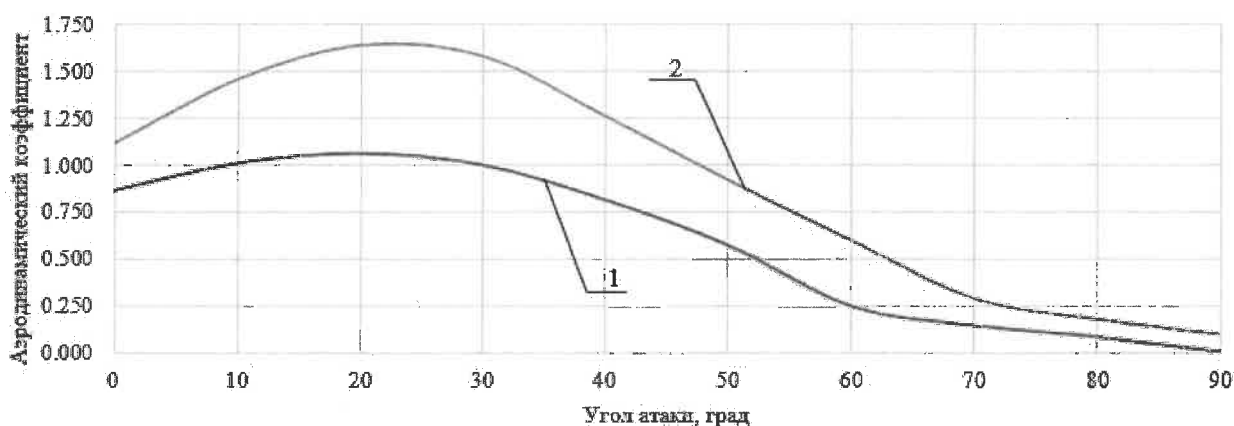


Рисунок 2 – Зависимость аэродинамического коэффициента от угла между осью пути и вектором скорости ветра:  
1 – компьютерное моделирование; 2 – результаты натурных испытаний [6]

Результаты расчета с достаточно высокой степенью точности согласуются с экспериментальными значениями, полученными при натурных испытаниях вагонов. Заниженное значение аэродинамического коэффициента, полученное по результатам моделирования, связано с использованием при расчетах упрощенной конструкции вагона, не учитывающей наличие различного размера и геометрии на его поверхности.

С увеличением угла атаки воздушного потока до 20° аэродинамический коэффициент возрастает более чем на 20 %, что связано с действием распределенных касательных сил на боковые стенки вагона. При дальнейшем увеличении данного угла значения аэродинамического коэффициента уменьшаются.

Таким образом, результаты исследования показали, что угол атаки воздушного потока оказывает существенное влияние на коэффициент аэродинамического сопротивления вагона. Наиболее неблагоприятные условия для движения транспортного средства, при которых действующая на него продольная сила максимальна, возникают при углах атаки воздушного потока от 10 до 30°. Данная информация должна учитываться как при закреплении вагонов от ухода, так и при анализе энергоэффективности транспортировки грузов железнодорожным транспортом.

#### Список литературы

- 1 Определение энергоэффективности грузовых вагонов / Бороненко Ю. П. [и др.] // Транспорт шелкового пути. – 2022. – № 2. – С. 22–30.
- 2 High-speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report: technical report / P. Derkowski [et al.]. – Washington : Transportation Technology Center, 2015. – 258 p.
- 3 **Ramlan, I.** Comparison between SolidWorks and Ansys flow simulation on aerodynamic studies / I. Ramlan, N. Darlis // Journal of Design for Sustainable and Environment. – 2020. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–9.
- 4 **Демьянчук, О. В.** Моделирование обтекания потоком воздуха прямоугольного параллелепипеда / О. В. Демьянчук // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Вып. 16. – С. 64–72.
- 5 **Шимановский, А. О.** Аэродинамика модели железнодорожного грузового вагона при разных углах атаки воздушного потока / А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 2 (67). – С. 23–29.
- 6 **Луговцов, М. Н.** Проектирование сортировочных горок / М. Н. Луговцов, В. Я. Негрей. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 170 с.

УДК 629.4.023.14

### ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ТЕЛЕЖЕК МОДЕЛИ КВЗ-И2 РЕФРИЖИРАТОРНЫХ ВАГОНОВ

*К. А. ЕМЕЛЬЯНОВА, Е. Н. КОНОВАЛОВ, М. И. ПАСТУХОВ, П. М. АФАНАСЬКОВ*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Основным критерием установления возможности продления срока службы тележек рефрижераторных вагонов, сверх назначенного (25 лет), является наличие у них остаточного ресурса, оцениваемое путем проведения расчета на прочность, а также проведение комплекса испытаний.

В качестве объекта исследования взяты тележки рефрижераторных вагонов модели КВЗ-И2 со сроком службы 37 лет и более. По результатам технического диагностирования для дальнейших исследований были отобраны тележки, в которых отсутствовали трещины и иные дефекты, а также коррозионные повреждения.

Расчет произведен методом конечных элементов с построением пространственной конечно-элементной модели рамы и надрессорной балки тележки с использованием конечно-элементного пакета SolidWorks 2021. Элементы конструкции тележки имитировались объемными параболическими конечными элементами с тремя степенями свободы в каждом узле. Химический анализ материала надрессорной балки и рамы показал, что по химическому составу и механическим свойствам материал соответствует стали Ст10.

Прочность надрессорной балки и рамы вагона в соответствии с требованиями оценивалась при трех расчетных режимах: Ia, Ib, Iv. Режиму Ia соответствует сочетание сил, действующих на вагон при соударении при роспуске с сортировочной горки, осаживании состава вагонов, режиму Ib – при трогании состава, режиму Iv – при торможении и разгоне состава.

В модели надрессорной балки имитировались верхние и нижние опорные поверхности рессорных комплектов центрального подвешивания. Нижние опорные поверхности рессорных комплектов закреплялись от поперечных и вертикальных перемещений. Продольная сила приложена к упорной поверхности подпятника и уравновешена реакцией в ограничителях продольных перемещений одной колесной пары с одной стороны проема для их установки (наружной или внутренней). Сила тяжести приложена к опорной поверхности подпятника тележки и рабочей поверхности бокового скользуна при использовании боковых скользунов постоянного контакта.