

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 533.6.011:004.94

EDN: <https://elibrary.ru/tyufkh>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство

А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук✉

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
Гомель, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается обтекание железнодорожного вагона воздушным потоком при разных направлениях его скорости. Основной целью исследования является установление значений продольных и поперечных сил, действующих на вагон, для всего возможного диапазона изменения угла атаки воздушного потока.

Материалы и методы. Моделирование аэродинамики воздушного потока выполнено в программном комплексе ANSYS CFX, предназначенном для решения задач методом конечных объемов. В процессе расчета осуществлялось численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, для замыкания которых использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

Результаты. Для разных значений угла атаки воздушного потока получены зависимости распределения скоростей потока и давлений на лобовую и боковые поверхности транспортного средства, а также значения продольной и поперечной сил, действующих на вагон со стороны ветра. Показано, что значение угла атаки воздушного потока оказывает существенное влияние на положения линий тока и значения коэффициента аэродинамического сопротивления вагона. В ходе расчетов установлено, что действующая на рассматриваемое транспортное средство продольная сила максимальна при значениях угла атаки воздушного потока от 10 до 30°. Наибольшие поперечные силы реализуются при углах атаки от 45 до 90°.

Обсуждение и заключение. Разработанная методика компьютерного моделирования обтекания вагона потоком воздуха может быть применена для анализа аэродинамических сил, действующих на иные транспортные средства. Полученные в ходе расчетов результаты могут быть использованы при цифровизации производственных процессов эксплуатации железнодорожного подвижного состава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный вагон, обтекание потоком воздуха, компьютерное моделирование, аэродинамика, аэродинамический коэффициент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шимановский А. О., Демьянчук О. В. Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 81–91.

Original article

UDK 533.6.011:004.94

EDN: <https://elibrary.ru/tyufkh>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Airflow direction influence on aerodynamic forces acting on a vehicle

Alexandr O. Shimanovsky, Volha U. Dzemyanchuk✉

Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The paper considers the airflow around a railway car at different directions of its speed. The main purpose of the study is to determine the values of the longitudinal and transverse forces acting on the car for the entire possible range of changes in the angle of attack of the airflow.

Materials and methods. The simulation of airflow aerodynamics is performed in the ANSYS CFX software package, designed to perform tasks using the finite volume method. During the calculation, the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations were numerically solved, and for their closure was used the $k-\varepsilon$ turbulence model.

Results. The authors obtained dependences of the distribution of flow velocities and pressures on the frontal and lateral surfaces of the vehicle, as well as the values of the longitudinal and transverse forces acting on the car from the wind for different values of the angle of attack of the airflow. It is shown that the value of the angle of attack of the airflow has a significant effect on the positions of the current lines and the values of aerodynamic resistance coefficient of the car. During the calculations, it was found that the longitudinal force acting on the vehicle under consideration is maximum at the values of the angle of attack of the airflow from 10 to 30°. The greatest transverse forces are realised at angles of attack from 45 to 90°.

Discussion and conclusion. The developed method of computer simulation of streamline by airflow may be used to analyse the aerodynamic forces acting on other vehicles. The obtained results during calculations could be used in the digitalisation of production processes for the operation of railway rolling stock.

KEYWORDS: railway car, streamline by airflow, computer simulation, aerodynamics, aerodynamic coefficient

FOR CITATION: Shimanovsky A.O., Dzemyanchuk V.U. Airflow direction influence on aerodynamic forces acting on a vehicle. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):81–91. (In Russ.).

✉ olga.demyanchuk.98@mail.ru (V. U. Dzemyanchuk)

© Shimanovsky A. O., Dzemyanchuk V. U., 2025

Введение. Цифровизация процессов при эксплуатации транспортных средств требует наличия уточненной информации о технических характеристиках подвижного состава и действующих на него при различных ситуациях силах. Полномасштабные испытания отличаются сложностью и высокой стоимостью выполнения, а испытания в аэродинамической трубе не в полной мере отражают сложную геометрию объектов и реалистичные условия течения, наблюдаемые в полномасштабных моделях, поэтому компьютерное моделирование является более предпочтительным методом для исследования аэродинамики поездов. Рост производительности компьютеров раскрыл широкие перспективы для исследования проблем аэродинамики транспортных средств методами вычислительной гидродинамики. В настоящее время благодаря использованию высокоточных методов CFD-моделирование является одним из основных методов получения аэродинамических характеристик различных объектов.

Существует ряд работ, в которых анализируется обтекание транспортных средств воздушным потоком, направленным вдоль оси пути. Так, расчеты с использованием метода моделирования больших вихрей (Large Eddy Simulation — LES) представлены в работе [1]. Авторами получены картины распределения скоростей воздушного потока, значения сил воздушного сопротивления, на основании которых определены коэффициенты аэродинамического сопротивления. Выполнено сравнение результатов с данными полномасштабных экспериментов, продемонстрировавшее достаточно высокую степень сходимости.

В работе [2] исследуются характеристики широко используемых методов моделирования турбулентных течений для прогнозирования поля потока вокруг высокоскоростного поезда ICE3: RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes — усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса), SAS (Scale-Adaptive Simulation — масштабно-адаптивное моделирование), DES (Detached-Eddy Simulation — моделирование отдельных вихрей) и LES (Large Eddy Simulation — моделирование больших вихрей). Авторами отмечается, что определенный по результатам моделирования аэродинамический коэффициент зависит от метода моделирования турбулентности и качества сетки в меньшей степени, чем характер потока. Таким образом, если требуется получить только значения данного коэффициента, то необходимость использования более ресурсозатратных моделей и сеток отсутствует.

В работе [3] исследуется влияние спойлеров, установленных на крыше поезда на различной высоте, на аэродинамические характеристики и структуру воздушного потока высокоскоростного поезда. Изменение расположения спойлера по высоте вызывает значительное изменение подъемной силы, в то время как

на лобовое сопротивление оно практически не влияет. Точность численного метода была подтверждена экспериментами в аэродинамической трубе.

В статье [4] описывается связь между аэродинамическим сопротивлением и структурой потока при движении высокоскоростного поезда. В качестве объекта исследования используется модель поезда ICE2. Валидация проводится путем сравнения с существующими исследовательскими данными, а также на основе исследований сеточной независимости. Численное моделирование взаимодействия высокоскоростного поезда с воздушной средой, сооружениями и конструкциями инфраструктуры в среде программного комплекса ANSYS CFX выполнено в работе [5]. Получены картины распределения скоростей воздушного потока и аэродинамических сил, действующих на подвижной состав. Достоверность полученных результатов была подтверждена экспериментально.

Несмотря на то, что скорость движения грузового поезда значительно ниже, чем у высокоскоростных пассажирских поездов, 80 % общего сопротивления при скорости 115 км/ч также обусловлено аэродинамическим сопротивлением. В работе [6] к моделированию аэродинамики грузовых поездов была применена модель турбулентности STRUT—ε для замыкания уравнений URANS. Этот подход направлен на повышение надежности и применимости гибридных моделей турбулентности, опираясь на эффективность широко проверенной k —ε модели, при этом используя локально необходимое разрешение сложных нестационарных структур течения. Работа продемонстрировала возможности подхода с использованием более грубых сеток, что позволяет сократить общее время вычислений в несколько раз и дает возможность оптимизации конструкции, в том числе с целью обеспечения устойчивости при боковом ветре.

Аналогичные задачи решены также и в иных публикациях, причем исследования посвящены главным образом определению влияния бокового ветра на обтекание транспортных средств и мостов при наличии ветрозащитных стен, установлению поперечных сил, действующих на вагоны при разных формах носовой части поезда, а также анализу влияния конфигурации тележек и наличия наземной инфраструктуры на аэродинамические силы, возникающие вследствие воздействия бокового ветра [7]. Выполненные в работе [8] исследования показали, что с увеличением угла атаки воздушного потока значения коэффициентов подъемной и боковой сил увеличиваются. Например, при угле атаки 60° коэффициент боковой силы оказывается в 2,5 раза большим, чем при 30°.

В работе [9] представлены результаты численного моделирования аэродинамических характеристик высокоскоростного поезда, проходящего через различные

области тоннелей при действии бокового ветра. Исследование показало, что условия за пределами туннеля оказывают значительное влияние на аэродинамические характеристики. Наименьшие аэродинамические силы наблюдаются при движении по мосту, расположенному вблизи входа в туннель. Взаимовлияние движущегося поезда, туннеля и бокового ветра приводит к изменению поля потока как внутри, так и снаружи туннеля.

Лишь относительно небольшое число публикаций посвящено исследованиям аэродинамических характеристик грузовых поездов. Так, в работе [10] проанализировано влияние на них геометрии крыши и нижней части кузова. В ходе испытаний в аэродинамической трубе масштабированной модели поезда установлено, что наиболее существенное влияние на аэродинамический коэффициент формы поверхности кузовов вагонов имеет место при углах атаки воздушного потока от 40 до 60°.

Моделирование обтекания воздушным потоком грузового поезда при воздействии бокового ветра с двумя различными углами отклонения ветрового потока 10° и 30° выполнено в статье [11]. Показано, что наибольшие изменения скорости потока в межвагонных промежутках по сравнению со случаем отсутствия бокового ветра наблюдаются при угле 30°. Также авторами проанализирована структура воздушного потока, которая может вызвать потерю устойчивости вагонов грузового поезда при воздействии бокового ветра.

Ряд работ посвящен исследованию аэродинамики вагонов, загруженных контейнерами, и контейнерных поездов. Оценка возможностей различных подходов к моделированию турбулентности для прогнозирования аэродинамического потока вокруг загруженной контейнером одиночной платформы, а также при следовании ее в составе поезда представлена в работе [12]. Отмечено, что результаты моделирования хорошо согласуются с данными, полученными при эксперименте в аэродинамической трубе как в качественном, так и в количественном отношении.

В работе [13] рассматривается, как расположение и длина контейнера, размещенного на вагоне-платформе в составе поезда, влияют на аэродинамику и значение лобового сопротивления. Приведены результаты испытаний масштабной модели в аэродинамической трубе. Установлено, что величина расстояния между соседними вагонами оказывает влияние на отрыв потока и характер пограничного слоя, а также на значение аэродинамического сопротивления поезда. Испытания, проведенные в работе [14], показали, что лобовое сопротивление возможно уменьшить на 30 % за счет уменьшения расстояния между соседними вагонами-платформами поезда.

Авторами [15] проведено моделирование обтекания воздушным потоком загруженного контейнерами

грузового поезда в случаях их различного размещения на платформах, в том числе в два яруса. Проанализировано влияние на лобовое сопротивление наличия порожних платформ между контейнерами и выполнено сравнение результатов расчетов с данными, полученными в ходе испытаний в аэродинамической трубе. На основании полученных результатов авторами предложены варианты размещения контейнеров на платформах в составе поезда, позволяющие снизить сопротивление движению поезда.

Авторами [16] разработана методика анализа аэродинамики вагонов на цифровых моделях поездов и получены значения давлений и силы аэродинамического сопротивления поезда, локомотива, полувагонов в груженом и порожнем состояниях. Проверка достоверности полученных результатов выполнена на основании сравнения с данными экспериментов, в результате которого установлено, что расхождение не превышает 15 %.

Процесс аэродинамического взаимодействия подвижного состава и искусственных сооружений тоннельного типа рассмотрен в работе [17]. По результатам численного моделирования в программе Solid Works установлено, что использование средств нивелирования колебания воздушного давления позволяет в несколько раз уменьшить скорость воздушного потока, воздействующего на подвижной состав и тоннельные сооружения, а также стабилизировать давление воздушных масс, приблизив его к нормальному атмосферному.

Выполненный анализ исследований показывает, что к настоящему времени получено решение ряда задач, связанных с обтеканием транспортных средств воздушным потоком. Однако влияние его направления на возникающие продольные и поперечные силы исследовано недостаточно. Поэтому в данной работе поставлена цель по установлению возможного влияния диапазона изменения угла атаки воздушного потока на величину продольных и поперечных сил, действующих на вагон.

Материалы и методы, модель вагона, обтекаемого воздушным потоком. Для выполнения численного моделирования аэродинамики воздушного потока использовался программный комплекс ANSYS CFX. Созданная в приложении Design Modeler геометрическая модель представляет собой параллелепипед, соответствующий размерам крытого вагона модели 11-264 (длина — 13 м, ширина — 3 м, высота — 4,5 м, причем учитывалось наличие зазора между дном вагона и уровнем пути), который расположен в расчетной области, представляющей собой объем воздуха также в форме параллелепипеда (длина — 65 м, ширина — 29 м, высота — 16,7 м). Размеры расчетной области были установлены с учетом целесообразного

использования вычислительных ресурсов и обеспечения получения независимых результатов расчета в ранее выполненных работах [18, 19]. На рис. 1 приведены схемы, иллюстрирующие расположение элементов модели для случаев действия ветрового потока вдоль пути и под углом α к нему.

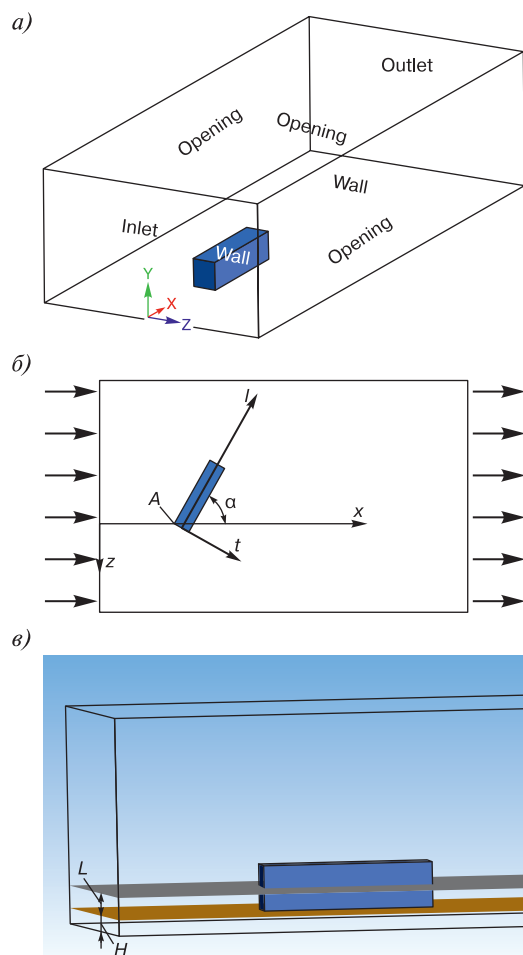


Рис. 1. Компьютерная модель расчетной области*:

- a* — геометрическая модель с граничными условиями;
b — расположение вагона при различных углах атаки воздушного потока; *c* — размещение горизонтальных поверхностей;
H — расстояние от поверхности земли до плоскости основания кузова вагона; *L* — расстояние от плоскости основания кузова вагона до расчетной плоскости; Opening, Inlet, Outlet, Wall — граничные условия на представленных поверхностях модели; *l* и *t* — оси, совпадающие с продольной и поперечной осями вагона; *A* — ребро вагона

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Computer model of computational area*:

- a* — geometry model with boundary conditions; *b* — car position under different angles of attack of airflow; *c* — placement of horizontal surfaces; *H* — distance from the surface to the plane of the car body base; *L* — distance from the plane of the car body base to the design plane; Opening, Inlet, Outlet, Wall — boundary conditions on demonstrated model surfaces; *l* and *t* — axes overlapping with longitudinal and transverse car axes; *A* — edge of the car

* Source: authors' data

Для генерирования расчетной сетки использованы методы «Hex Dominant Method» и «Multizone» применительно к элементам-гексаэдрам. С целью упрощения процесса построения сетки применялся инструмент «Virtual Topology», предназначенный для управления топологией геометрических объектов. Характерный размер элемента принят равным 0,375 м, локальный в области кузова — 0,187 м. Общее число элементов расчетной области, сгенерированных для разных расположений вагона, составило от 0,7 до 1,17 млн ячеек. Дальнейшее измельчение сетки вызывает увеличение продолжительности расчета, не оказывая при этом существенного влияния на точность результатов моделирования [18].

При моделировании обтекания воздушным потоком вагона выполнено численное решение уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS). Чтобы обеспечить замыкание системы уравнений, использована модель турбулентности $k-\varepsilon$, которая включает дифференциальные уравнения относительно кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ε [20, 21]. Несмотря на то, что RANS предоставляет усредненные по времени результаты, данный метод целесообразно использовать для анализа аэродинамики поездов, поскольку он обеспечивает значительно меньшие затраты вычислительных мощностей по сравнению с другими применяемыми в вычислительной гидродинамике методами и выполнение моделирования за относительно короткое время [7].

По аналогии с [22] моделирование осуществлялось при следующих граничных условиях: постоянная скорость воздушного потока ($v = 10$ м/с) задавалась на входе (Inlet), избыточное давление ($p = 0$) — на выходе (Outlet). Условие открытой границы (Opening) при заданном значении давления $p = 0$ использовалось для боковых и верхней поверхностей расчетной области и предполагало, что воздух может втекать и вытекать из расчетной области. Непроницаемые границы для потока были заданы с использованием условия жесткой стенки (Wall) на поверхности вагона и нижней поверхности расчетной области. Исходными расчетными параметрами приняты: тип среды — воздух с параметрами идеального газа, температура — 288 К, давление — 100 кПа, которым соответствует плотность воздуха — $1,225$ кг/м³, вязкость — $1,831 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с) [22].

Результаты расчетов и их обсуждение. Рассмотрено обтекание вагона воздушным потоком, угол атаки которого лежит в диапазоне от 0 до 90° (углу атаки воздушного потока соответствует угол поворота вагона в компьютерной модели). В ходе моделирования получены значения давлений воздуха на лобовую и боковую поверхности железнодорожного вагона. На различных высотах их значения отличаются несущественно.

Далее они приведены для поверхности, расположенной на высоте 1,75 м от основания кузова вагона.

Из рис. 2 видно, что с увеличением угла атаки воздушного потока распределение давлений на лобовой поверхности транспортного средства перестает быть симметричным относительно продольной плоскости симметрии вагона (рис. 2). При отклонении направления ветра от оси пути минимальное давление на боковую поверхность увеличивается с 4 до 27 Па, пока угол атаки ветрового потока не достигнет 40° (рис. 3). При увеличении угла атаки до 60° изменение давления оказалось незначительным. Последующий рост рассматриваемого угла до значения 90° привел к симметричному графику, подобному приведенному на рис. 2, а, что соответствует физической сущности рассматриваемых процессов.

Поскольку пространственная схема линий тока в расчетной области при различных углах атаки воздушного потока (рис. 4) имеет сложную конфигурацию и не позволяет в достаточной степени оценить характер потока, для упрощения анализа на рис. 5 приведены схемы линий тока в плоскости горизонтального сечения (ZX) на высоте 1,75 м от основания кузова вагона.

Результаты численного моделирования показали, что отклонение направления воздушного потока от оси железнодорожного пути не вызывает существенного изменения максимальных скоростей течения воздуха относительно вагона. Максимальная скорость течения при значении угла атаки воздушного потока 30° составляет 13,9 м/с, при значении угла атаки 50° — 14 м/с.

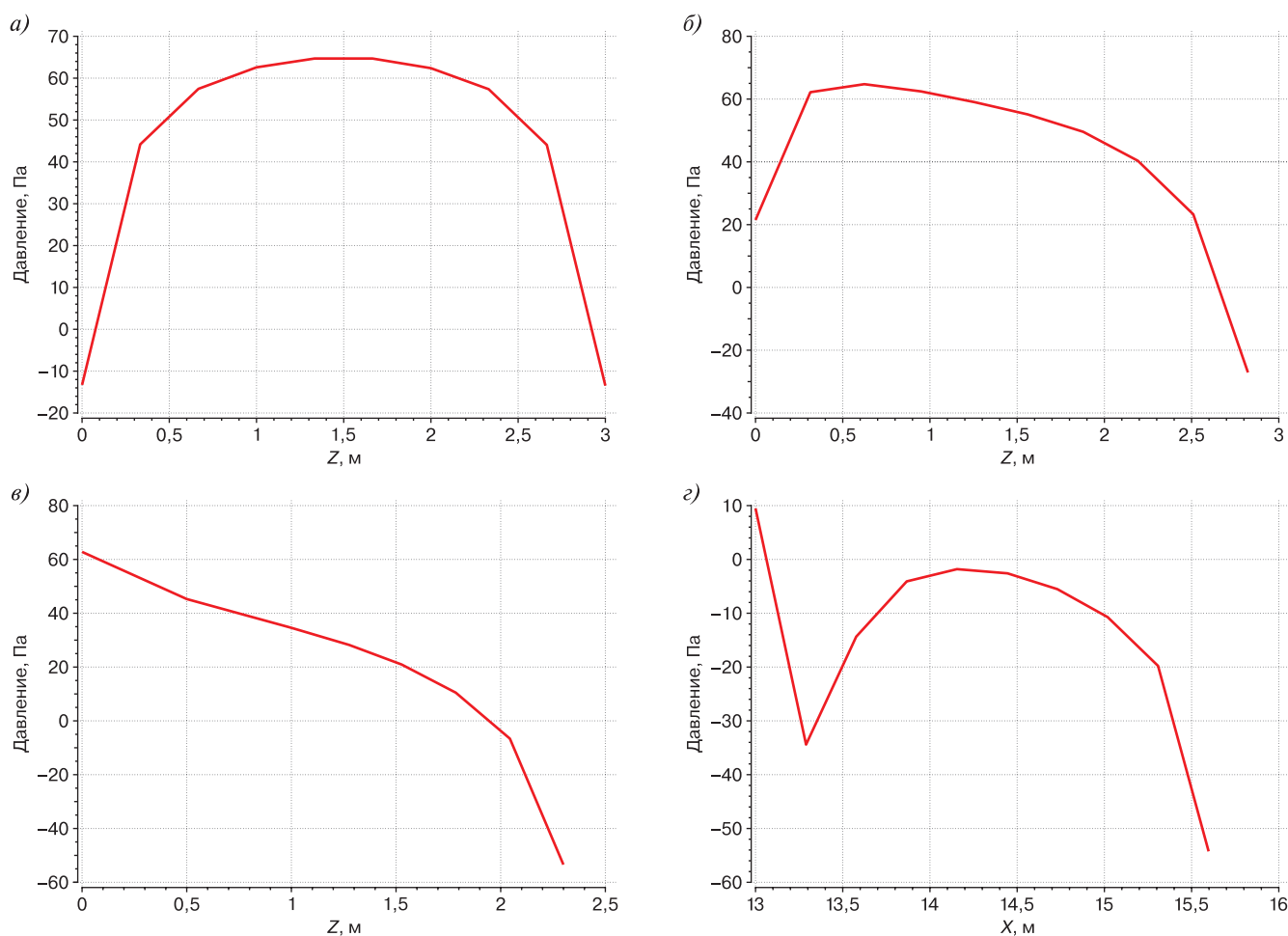


Рис. 2. Распределение давления на лобовую поверхность на высоте 1,75 м от основания кузова вагона при углах атаки*: а — 0° ; б — 20° ; в — 40° ; з — 60° ; z — координата по горизонтали от левого края вагона (т. А, рис. 1, б)

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Pressure distribution on the front plane at 1.75 m from the car body base under angle of attacks*: а — 0° ; б — 20° ; в — 40° ; з — 60° ; z — horizontal coordinate from the left edge of the car (p. A, fig. 1, б)

* Source: authors' data

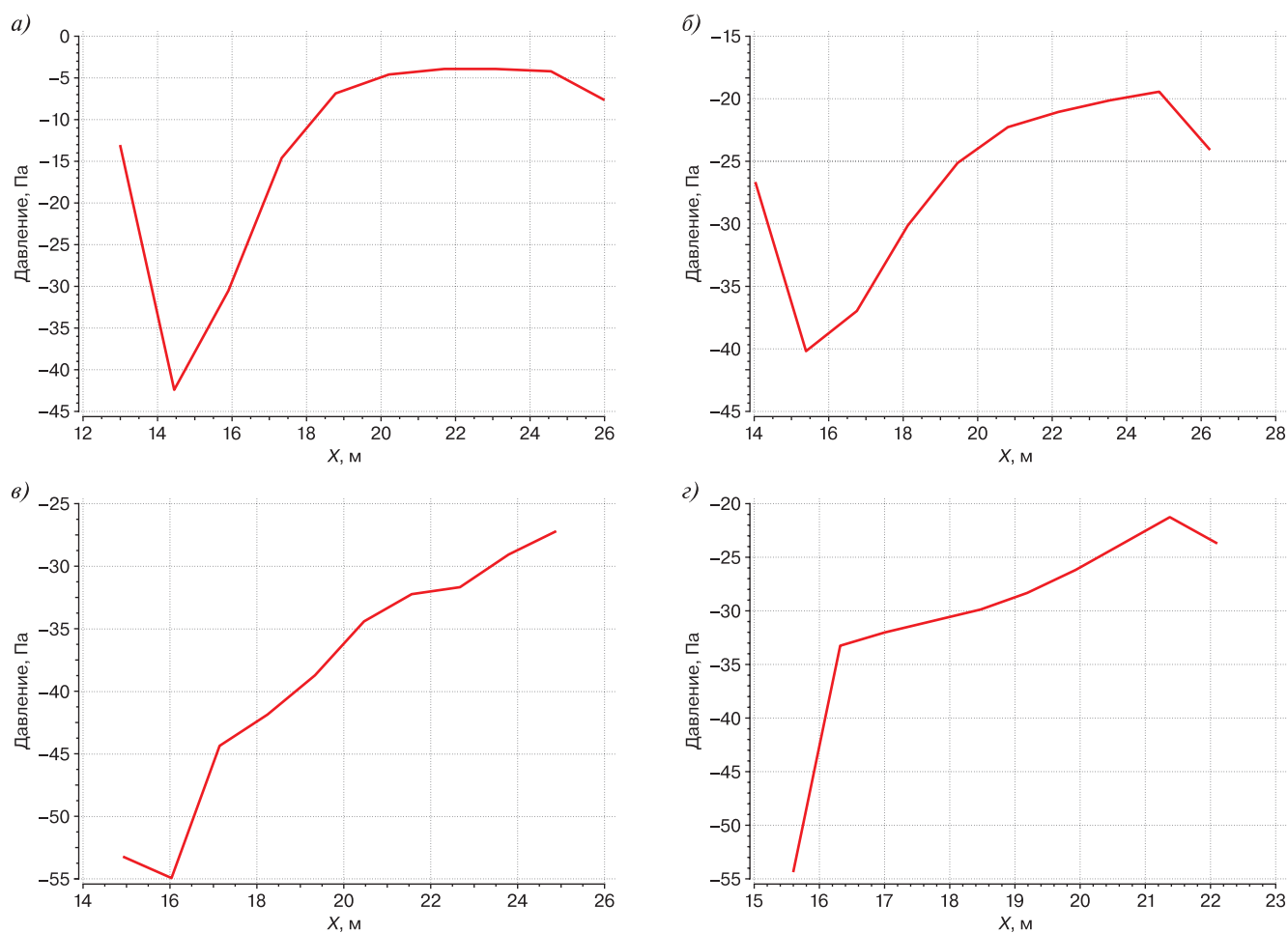


Рис. 3. Давления на боковые поверхности на высоте 1,75 м от основания кузова вагона при углах атаки*:

$a - 0^\circ$; $b - 20^\circ$; $v - 40^\circ$; $z - 60^\circ$

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Pressure on the side places at 1.75 m from the car body base under angle of attacks*:

$a - 0^\circ$; $b - 20^\circ$; $v - 40^\circ$; $z - 60^\circ$

* Source: authors' data

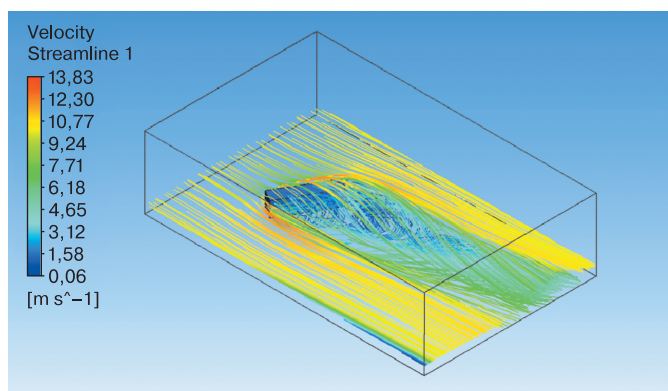


Рис. 4. Линии тока в расчетной области в случае обтекания вагона потоком воздуха при угле атаки 60° *

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Current lines in the design area in the case of car streamline by air flow at angle of attack of 60° *

* Source: authors' data

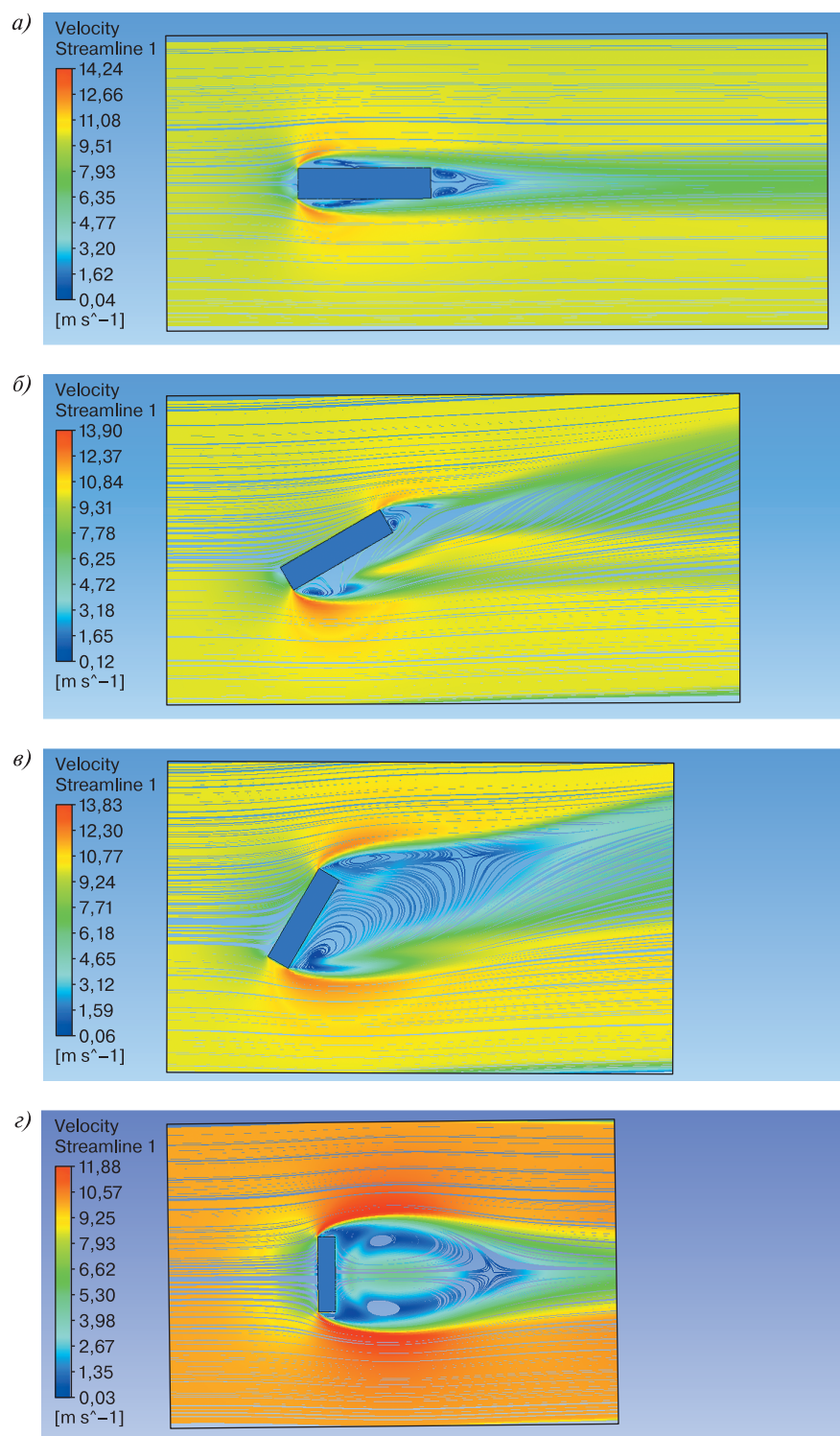


Рис. 5. Распределение скоростей потока в горизонтальном сечении расчетной области на высоте 1,75 м от основания кузова вагона при углах атаки*:
 $a - 0^\circ$; $б - 30^\circ$; $в - 60^\circ$; $г - 90^\circ$
 * Источник: данные авторов

Fig. 5. Distribution of flow velocities in the horizontal section of the design area at a height of 1.75 m from the car body base at angles of attack*:
 $a - 0^\circ$; $б - 30^\circ$; $в - 60^\circ$; $г - 90^\circ$
 * Source: authors' data

В то же время наблюдается изменение картин распределения скоростей воздушного потока (рис. 5). При значениях угла атаки больше 30° область, в которой наблюдаются возмущения воздушного потока, существенно расширяется. Если при 0 и 90° наибольшие градиенты скорости (им соответствуют места с резким изменением скорости воздушного потока) наблюдаются вблизи вертикальных ребер, ближайших к области входа, то при иных значениях угла атаки такие градиенты наблюдаются и в хвостовой части вагона.

Значения проекций равнодействующей силы давления воздуха на поперечную (F_l , Н) и продольную (F_x , Н) оси вагона (эти оси показаны на рис. 1) определены по формулам:

$$F_l = F_x \sin \alpha + F_z \cos \alpha; \quad (1)$$

$$F_x = F_x \cos \alpha - F_z \sin \alpha, \quad (2)$$

где F_x , F_z — проекции той же равнодействующей на оси x и z , Н; α — угол между вектором скорости ветра и осью пути, град.

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x определяется по формуле [3]:

$$C_x = \frac{2F_l}{\rho v^2 A}, \quad (3)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3 ; v — скорость входящего воздушного потока, м/с ; A — площадь поперечного сечения обтекаемого тела, м^2 .

Полученная расчетом зависимость аэродинамического коэффициента от угла между вектором скорости ветра и осью пути приведена на рис. 6.

Изменение угла атаки воздушного потока от 0° до 20° вызывает увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления более чем на 20%. Такой эффект обусловлен действием распределенных

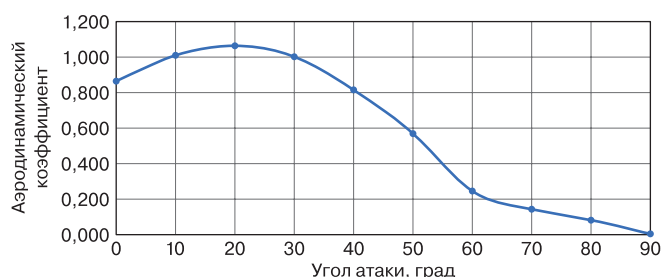


Рис. 6. Зависимость аэродинамического коэффициента от угла атаки*

* Источник: данные авторов

Fig. 6. Dependence of aerodynamic coefficient on the angle of attack*

* Source: authors' data

касательных сил на боковые поверхности вагона. При дальнейшем увеличении данного угла значения аэродинамического коэффициента уменьшаются.

Полученное по результатам численного моделирования изменение коэффициента аэродинамического сопротивления хорошо согласуется со значениями, определенными путем экспериментов¹.

На рис. 7 представлен график изменения боковой силы в зависимости от значения угла атаки.

Из представленного графика видно, что при значениях угла атаки в диапазоне от 0 до 50° значение боковой силы значительно увеличивается. При дальнейшем изменении угла атаки данное значение остается практически постоянным.

Обсуждение и заключение. Результаты выполненных расчетов показывают, что угол атаки воздушного потока оказывает существенное влияние на продольные и поперечные силы, действующие на вагон. Установлено, что наиболее неблагоприятные условия, при которых действующая на него продольная сила максимальна, возникают при углах атаки от 10 до 30° . Именно в этом случае значительно увеличивается вероятность самопроизвольного ухода со станционных путей недостаточно закрепленных вагонов при увеличении скорости ветра. Представленная методика компьютерного моделирования обтекания вагона потоком воздуха и полученные в ходе расчетов результаты могут быть использованы при автоматизации эксплуатации железнодорожного подвижного состава, например, для расчета количества средств закрепления подвижного состава на станционных путях в режиме реального времени на основании конкретных данных о составе, а также позволяют провести анализ необходимости дополнительных средств закрепления с учетом реальных погодных условий, что в дальнейшем может стать основой для совершенствования норм

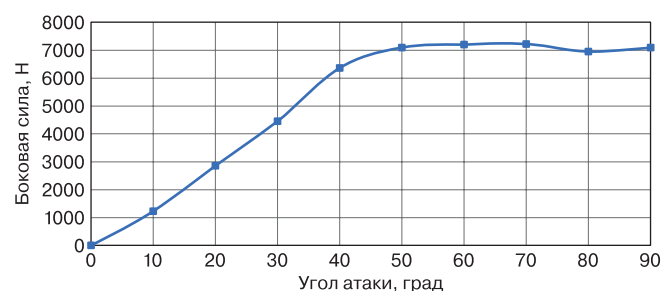


Рис. 7. График зависимости боковой силы от угла атаки воздушного потока при скорости ветра 15 м/с *

* Источник: данные авторов

Fig. 7. Graph of the lateral force dependence on the angle of attack of the airflow at a wind speed of 15 м/с *

* Source: authors' data

¹ Луговцов М. Н., Негрей В. Я. Проектирование сортировочных горок: учеб. пособие. Гомель: БелГУТ, 2005. 170 с.

расчета тормозных башмаков. Полученные результаты могут быть использованы для нахождения аэродинамических сил, действующих на автомобили и иные транспортные средства.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» (задание 1.08).

Funding: The work was carried out with the financial support of the State Scientific Research Programme "Mechanics, Metallurgy, Diagnostics in Mechanical Engineering" of the Republic of Belarus (task 1.08).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Krajnović S., Davidson L. Flow around a simplified car, Part 1: Large Eddy Simulation. *Journal of Fluids Engineering*. 2005;127(5):907–918. <https://doi.org/10.1115/1.1989371>.
- Wang S., Bell J. R., Burton D., Herbst A. H., Sheridan J., Thompson M. C. The performance of different turbulence models (URANS, SAS and DES) for predicting high-speed train slipstream. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;165:46–57. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.001>.
- Xiong X., Geng J., Wang K., Wang X. Effect of wing height layout on the aerodynamic performance of high-speed train. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2024;34(10):3731–3763. <https://doi.org/10.1108/HFF-02-2024-0136>.
- Li X. B., Liang X. F., Wang Z., Xiong X. H., Chen G., Yu Y. Z., Chen C. M. On the correlation between aerodynamic drag and wake flow for a generic high-speed train. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;215:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104698>.
- Лабу́тин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 4 (101). С. 6–16. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-1>.
- Labutin N. A. Development of a numerical model of the aerodynamic interaction of a high-speed train, air environment and infrastructure facilities. *World of Transport and Transportation*. 2022;20(4):6–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-1>.
- García J., Muñoz-Paniagua J., Xu L., Baglietto E. A second-generation URANS model (STRUCT-e) applied to simplified freight trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020;205:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104327>.
- Hemida H. Contribution of computational wind engineering in train aerodynamics — past and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;234:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105352>.
- Zhuang Y., Lu X. Numerical investigation on the aerodynamics of a simplified high-speed train under crosswinds. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2015;5(5):181–186. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.06.001>.
- Miao X., He K., Minelli G., Zhang J., Gao G., Wei H., He M., Krajnović S. Aerodynamic performance of a high-speed train passing through three standard tunnel junctions under crosswinds. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3664. <https://doi.org/10.3390/app10113664>.
- Reyes C. E. A., Rocchi D., Tomasini G., Sánchez M. I., Artano M. Effects of different aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;242:105588. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105588>.
- Flynn D., Hemida H., Baker C. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016;156:14–28. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.07.001>.
- Maleki S., Burton D., Thompson M. C. Assessment of various turbulence models (ELES, SAS, URANS and RANS) for predicting the aerodynamics of freight train container wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;170:68–80. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.008>.
- Li C., Burton D., Kost M., Sheridan J., Thompson M. C. Flow topology of a container train wagon subjected to varying local loading configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;169:12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.011>.
- Paul J. C., Johnson R. W., Yates R. G. Application of CFD to rail car and locomotive aerodynamics. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, And Trains*. 2009;41:259–297. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_25.
- Maleki S., Burton D., Thompson M. C. Flow structure between freight train containers with implications for aerodynamic drag. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019;188:194–206. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.02.007>.
- Бороненко Ю. П., Поляков Б. О., Белгородцева Т. М. Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 3(94). С. 57–61. EDN: <https://www.elibrary.ru/vysiiq>.
- Boronenko I. U. P., Poliakov B. O., Belgorodtseva T. M. Determination of aerodynamic resistance of cargo trains with open-top wagons in digital simulations. *Transport of the Russian Federation*. 2021;3(94):57–61. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vysiiq>.
- Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С., Каримов Д. Д., Сотников К. А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 3. С. 590–599. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-590-599>.
- Vorob'ev A. A., Vatulin Ya. S., Vataev A. S., Karimov D. D., Sotnikov K. A. On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022;19(3):590–599. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-590-599>.
- Демьянчук О. В. Моделирование обтекания потоком воздуха прямоугольного параллелепипеда // Механика. Исследования и инновации. 2023. Вып. 16. С. 64–72. EDN: <https://www.elibrary.ru/sfkchl>.
- Dzemyanchuk V. U. Simulation of air flow movement around a rectangular parallelepiped. *Mechanics. Research and Innovation*. 2023; 16:64–72. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/sfkchl>.
- Shimanovsky A. O., Dzemyanchuk V. U. Simulation of airflow movement around a vehicle. In: *XV Annual International Meeting of the Georgian Mechanical Union, Book of Abstracts*. Batumi, Georgia; 2024:180–181. EDN: <https://elibrary.ru/gxhvve>.
- Молчанов А. М. Математическое моделирование задач газодинамики и теплообмена. М.: МАИ, 2013. 206 с.
- Molchanov A. M. *Mathematical modeling of gas dynamics, heat, and mass transfer problems*. Moscow: MAI; 2013. 206 p. (In Russ.).
- Shimanovsky A. O., Kuzniatsova M. G., Yakubovich V. I. Dynamics of tank trucks with baffles for transportation of viscous liquids. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018;7(4):438–443. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.438-443>.
- Шимановский А. О., Демьянчук О. В. Аэродинамика модели железнодорожного грузового вагона при разных углах атаки воздушного потока // Механика машин, механизмов и материалов. 2024. № 2 (67). С. 23–29. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-23-29>.

Shimanovsky A. O., Dzemyanchuk V. U. Railway freight car model aerodynamics at different airflow attack angles. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2024;2:23–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-23-29>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Олегович ШИМАНОВСКИЙ,

д-р. техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Ольга Владимировна ДЕМЬЯНЧУК,

аспирант кафедры «Техническая физика и теоретическая механика», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), Author ID: 1169204, <https://orcid.org/0009-0002-7063-4183>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandr O. Shimanovsky,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Technical Physics and Theoretical Mechanics Department, Belarusian State University of Transport (246653, Republic of Belarus, Gomel, 34, Kirova St.), Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Volha U. Dzemyanchuk,

Postgraduate Student of Technical Physics and Theoretical Mechanics Department, Belarusian State University of Transport (246653, Republic of Belarus, Gomel, Kirova St., 34), Author ID: 1169204, <https://orcid.org/0009-0002-7063-4183>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Олегович ШИМАНОВСКИЙ. Формулировка цели и методологии исследования, анализ результатов, выводы (30 %).

Ольга Владимировна ДЕМЬЯНЧУК. Разработка компьютерных моделей, выполнение расчетов, описание результатов и их анализ, написание статьи (70 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexandr O. Shimanovsky. Formulation of the purpose and methodology of the study, analysis of the results, conclusions (30 %).

Volha U. Dzemyanchuk. Development of computer models, calculations performing, results description and analysis, article writing (70 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 18.12.2024, рецензия от первого рецензента получена 09.01.2025, рецензия от второго рецензента получена 13.01.2025, рецензия от третьего рецензента получена 22.01.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 23.01.2025, принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 18.12.2024, first review received 09.01.2025, second review received 13.01.2025, third review received 22.01.2025, fourth review received 23.01.2025, accepted for publication 25.04.2025.