

УДК 533.6.011:004.94

А.О. ШИМАНОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.
заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика»¹
E-mail: tm.belsut@gmail.com

О.В. ДЕМЬЯНЧУК
аспирант кафедры «Техническая физика и теоретическая механика»¹
E-mail: olga.demyanchuk.98@mail.ru

¹Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28.03.2024.

АЭРОДИНАМИКА МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ГРУЗОВОГО ВАГОНА ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ АТАКИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Рассматривается решение задачи об обтекании потоком воздуха модели вагона, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда. Приведены результаты компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS CFX аэродинамики воздушного потока при его отклонении от продольной оси вагона. Для замыкания уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, использована k-ε-модель турбулентности. Получены картины распределения скоростей потока и давлений на лобовую и боковые поверхности транспортного средства (ТС). Определены значения аэродинамических коэффициентов сопротивления вагона в зависимости от угла атаки. Показано, что при увеличении угла атаки с 0 до 10° аэродинамический коэффициент изменяется нелинейно и такое увеличение соответствует экспериментальным значениям. Разработанная методика численного моделирования позволяет анализировать обтекание воздушным потоком как железнодорожного подвижного состава, так и автомобилей.

Ключевые слова: аэродинамика, обтекание потоком воздуха, компьютерное моделирование, аэродинамический коэффициент

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-23-29>

Аэродинамическое сопротивление, определяющее величину основного сопротивления движению подвижного состава, существенно влияет на тягово-энергетические характеристики поезда. Для грузового поезда из 60 вагонов при скорости 90 км/ч сопротивление воздуха составляет около 60 % основного сопротивления движению, причем авторы работы [1] отмечают, что значения воздушного сопротивления, создаваемого поездами с различной схемой расположения вагонов в составе, различаются более чем на 400 %.

В настоящее время разработаны и запущены в серийное производство грузовые вагоны с улучшенными техническими параметрами, достигнуто увеличение объема кузова, разработаны новые конструкции тележек. Однако при определении основного сопротивления движению грузовых вагонов используют обобщенные коэффициенты, установленные Правилами тяговых расчетов для полувагонов, рефрижераторов и цистерн. Несмотря на то, что в [2] представлены более точные зависимости для расчета основного сопротивления движению грузовых вагонов, которые учитывают большее разнообразие аэродинамических коэф-

фициентов, но и они не принимают во внимание воздействие ряда факторов и требуют уточнения.

Расчет ветровых нагрузок, исходя из которых определяются аэродинамические параметры ТС, выполняется на основе натурных испытаний подвижного состава, испытаний масштабируемых моделей в аэродинамических трубах, а также методов вычислительной гидродинамики. Автомобили в большинстве случаев тестируются в полноразмерном масштабе на движущейся поверхности. Испытания железнодорожных ТС выполняются в аэродинамической трубе на масштабируемых моделях при неподвижной поверхности [3].

Однако полномасштабные эксперименты требуют использования сложного оборудования. Их результаты существенно зависят от изменяющихся погодных условий и характеризуются большим разбросом данных, которые для обеспечения достоверности требуют тщательной обработки. Проведение испытаний в аэродинамической трубе обеспечивает возможность управления условиями окружающей среды и другими влияющими на конечный результат параметрами. Однако использование полученных данных требует при расчетах

полномасштабных объектов применения теории аэродинамического подобия.

В настоящее время широкое распространение получило компьютерное CFD-моделирование (CFD — Computational Fluid Dynamics), которое может обеспечить высокую детализацию при исследовании обтекания воздушным потоком железнодорожного подвижного состава. Его использование дает высокую точность и быстроту получения результатов, сравнительно низкую стоимость выполнения исследований. Однако в этом случае возможно возникновение численных ошибок, которое связано с зависимостью точности результатов от степени соответствия модели реальному прототипу, а также правильности задания параметров моделирования [4, 5].

В статье [6] рассматривается динамический анализ порожних полувагонов при обтекании их потоком воздуха с применением CFD-моделирования. Результаты расчетов показали, что при использовании упрощенной геометрии вагонов коэффициент лобового сопротивления оказывается на 20 % ниже, чем полученный на основе детализированной модели. Также выявлено, что упрощенная модель кузова не позволяет достоверно описать турбулентные процессы.

Авторами статьи [7] на основании компьютерного моделирования и испытаний в аэродинамической трубе создана база данных о моментах опрокидывания при боковом ветре. Данные легли в основу системы ограничения скорости в режиме реального времени для расчета безопасной скорости движения с учетом данных о характеристиках ветра.

Ряд работ посвящен проблеме воздействия на подвижной состав бокового ветра [3, 8, 9]. Так, авторы статьи [3] рассматривают целесообразность использования различных подходов для определения ветровых нагрузок. Методы RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) дают осредненные результаты, которых достаточно для решения большей части задач. Однако точность таких методов снижается при больших углах отклонения продольной оси ТС от направления воздушного потока, а также при моделировании ТС, имеющих сложную форму поверхности. Для таких типов течений необходимо использовать методы моделирования больших (LES) и отдельных (DES) вихрей. Эти методы превосходят методы RANS по точности, однако требуют значительно больших затрат вычислительных мощностей.

В работе [8] выполнены испытания в аэродинамической трубе пассажирского поезда и создана компьютерная модель, которая позволила проанализировать распределение давления на поверхности поезда. Сравнение результатов, полученных на основе испытаний в аэродинамической трубе и CFD-моделирования, показало, что рассчитанный коэффициент боковой силы оказался несколько

выше полученного при испытаниях, а отличие коэффициентов подъемной силы незначительно. Увеличение коэффициента боковой силы может быть связано с упрощением геометрии при моделировании.

В работе [9] отмечается, что не только высокоскоростные, но и курсирующие со значительно более низкими скоростями поезда могут подвергаться высокому риску опрокидывания из-за бокового ветра. В ходе тестирования в аэродинамической трубе масштабированной модели выполнена оценка влияния геометрии крыши и нижней части кузова на аэродинамические характеристики поезда. Установлено, что влияние формы поверхности кузовов вагонов на аэродинамический коэффициент наиболее сильно проявляется при углах атаки воздушного потока от 40 до 60°. По мере увеличения скорости движения поезда значения названных углов снижаются.

Авторами [10] выполнено имитационное моделирование ветровой нагрузки на поезд в программном обеспечении SOLIDWORKS Flow Simulation. Установлено, что существенное влияние на величину аэродинамического сопротивления движению оказывает не только скорость ветрового потока, но и его направление относительно оси движения поезда. Показано, что ветровая нагрузка оказывает существенное влияние на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

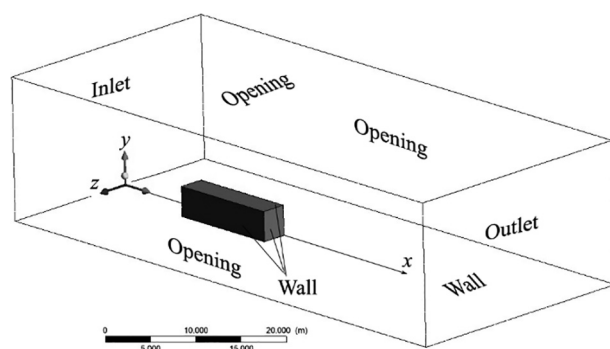
В работе [11] на основе полученных результатов моделирования обтекания вагона воздушным потоком были установлены размеры вычислительной области, которые обеспечивают минимальную продолжительность расчета при сохранении требуемой точности получаемых результатов. Также исследование показало, что модель турбулентности $k-\epsilon$ является наиболее предпочтительной для решения данной задачи.

Таким образом, в настоящее время существует достаточно большое число работ, в которых рассматривается действие воздушного потока вдоль оси пути или на боковые стенки кузова. В то же время недостаточно изучены ситуации, при которых направление воздушного потока составляет некоторый угол с продольной осью ТС. Поэтому *целью данной работы* стал анализ влияния направления ветровой нагрузки на ТС при различных углах атаки воздушного потока.

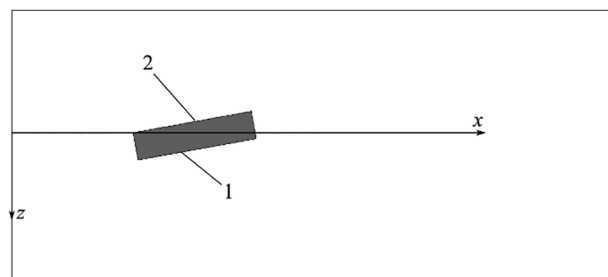
Методика моделирования. Моделирование аэродинамики воздушного потока выполнялось в программном комплексе ANSYS CFX. Объектом моделирования является упрощенная конструкция крытого вагона в виде параллелепипеда, размеры которого соответствуют полномасштабному прототипу (длина — 13 м, ширина — 3 м, высота — 3,5 м). Расчетная область представляет собой объем воздуха, из которого удалено пространство, соответствующее модели железнодорожного вагона. Размеры расчетной области, позволяющие исключить

ее влияние на поле потока, установлены в работе [11] и составляют: длина — 65 м, ширина — 29 м, высота — 16,7 м. На рисунке 1 представлена моделируемая расчетная область с железнодорожным вагоном, расположенным строго по направлению воздушного потока и под углом к нему.

При построении расчетной сетки использован метод Hex Dominant Method, позволяющий строить сетки на основе элементов-гексаэдров, а также инструмент Sizing, предоставляющий возможность управления размером сеточных элементов на ребрах, поверхностях, 3D-телах геометрической модели. Следует отметить, что не при всех параметрах сетки обеспечивается сходимость решения. Так, при моделировании обтекания железнодорожного вагона потоком воздуха под углом к оси пути использование тетраэдральной сетки, как это было сделано в случае моделирования при действии ветра вдоль железнодорожного пути [11], не позволило получить сходящееся решение. При повороте вагона возможно обеспечить сходимость решения только при использовании сетки из гексаэдров. В результате генерирования сетки общее число элементов составило 700 тыс. ячеек, характерный размер элемента при этом равнялся 0,375 м, локальный размер сетки в области вагона уменьшен до 0,187 м. При моделировании установлено, что последующее измельчение сетки не оказывает существенного влияния на точность получаемых результатов, однако увеличивает продолжительность расчета [11].



a



b

Рисунок 1 — Компьютерная модель расчетной области при угле между осью пути и направлением скорости ветра 0° (a) и 10° (b): 1, 2 — левая и правая боковые поверхности вагона по отношению к набегающему воздушному потоку

Figure 1 — Computer model of the calculation area at an angle between the track axis and the wind speed direction of 0° (a) and 10° (b): 1, 2 — left and right side surfaces of the car in relation to the incoming airflow

В качестве граничных условий (см. рисунок 1 a) были использованы: на входе (Inlet) постоянная скорость воздушного потока $v = 10$ м/с, на выходе (Outlet) — давление $p = 0$. Для боковых и верхней поверхностей расчетной области задано условие открытой границы (Opening), предполагающее, что воздух может втекать и вытекать из расчетной области, причем значение давления на этой границе принято $p = 0$. На нижней поверхности расчетной области и поверхности вагона использовано условие жесткой стенки (Wall), связанное с наличием непроницаемых границ для потока, для которых дополнительно задано условие прилипания (No Slip Wall), что соответствует равенству нулю скорости потока на границе $u = 0$.

Исходными расчетными параметрами приняты: тип среды — идеальный газ, температура — 288 К, давление — 100 кПа, скорость потока воздуха — 10 м/с.

Численное моделирование выполнялось на основе решения уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений изменения количества движения Навье–Стокса, для замыкания которых используется модель турбулентности k - ϵ , представляющая собой систему двух дифференциальных уравнений относительно кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ϵ [12–14]. При моделировании пограничного слоя использованы масштабированные пристеночные функции, которые в ANSYS CFX используются по умолчанию. Задача решалась в стационарной постановке.

Сходимость решения оценивалась по критерию уровня среднеквадратических невязок уравнения неразрывности и моментов количества движения, который принимался равным 10^{-4} . Сходимость была достигнута по истечении 30 итераций (при заданном максимальном значении 100 итераций) при уровне сходимости 10^{-4} – 10^{-5} .

Результаты численного моделирования. Расчеты выполнялись для угла атаки в диапазоне от 0 до 10°. На рисунках 2, 3 приведены графики распределения давления на лобовой и боковой поверхностях при обтекании воздушным потоком железнодорожного вагона в случаях различных углов атаки. Характер распределения давлений на разных высотах изменяется незначительно. В качестве примера далее представлены результаты для поверхности на высоте 1,75 м от основания вагона, которая соответствует половине высоты кузова вагона.

Из приведенных графиков видно, что при отклонении направления ветра от продольной оси ТС распределение давлений на лобовой поверхности вагона перестает быть симметричным относительно продольной плоскости симметрии вагона, причем значения давлений в точках, находящихся в этой плоскости, принимает меньшие показатели по сравнению с давлением при направлении действия ветра вдоль оси пути.

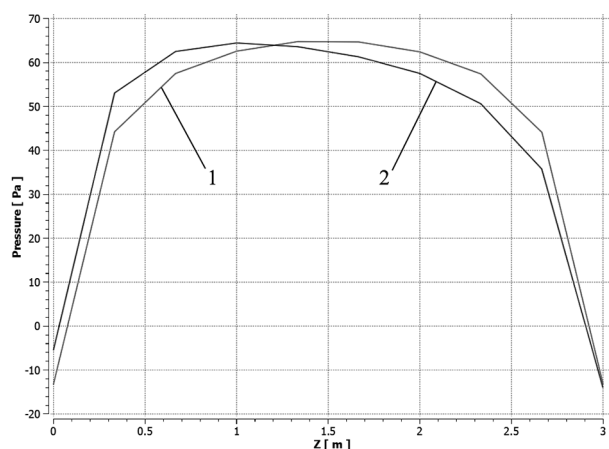


Рисунок 2 — Графики распределения давления на лобовой поверхности на высоте 1,75 м от основания вагона при углах атаки 0° (линия 1) и 10° (линия 2)
Figure 2 — Graphs of pressure distribution on the frontal surface at a height of 1.75 m from the car base at attack angles of 0° (line 1) and 10° (line 2)

Графики, построенные для боковой поверхности вагона, показывают, что при отклонении направления ветра от оси пути давление на эту поверхность значительно уменьшается (максимальное значение изменяется от 42 Па при угле 0° до 34 Па при угле 10°), за исключением хвостовой части, где наблюдается его резкое увеличение.

На рисунках 4, 5 приведены схемы распределения скоростей потока в расчетной области при углах атаки 0 и 10° в плоскостях сечения ZX на высоте 1,75 м от основания вагона и сечения XY вдоль оси железнодорожного пути.

Анализ распределения скоростей показал, что незначительное отклонение от оси пути обтекающего вагона потока воздуха не оказывает существенного воздействия на максимальные скорости течения воздуха относительно железнодорожного вагона. При направлении ветра вдоль пути максимальное значение скорости течения воздуха составляет 12,59 м/с, отклонение направления ветра на 10° вызывает увеличение скорости до 12,85 м/с. Однако при этом изменяются картины распределения скоростей, как это видно на представленных рисунках.

На основании полученных результатов моделирования определена сила, действующая вдоль железнодорожного пути на вагон, в соответствии со следующим выражением:

$$F = F_x \cdot \cos \alpha - F_z \cdot \sin \alpha,$$

где F_x — сила, действующая на вагон вдоль оси x , Н; F_z — сила, действующая на вагон вдоль оси z , Н; α — угол между осью пути и вектором скорости ветра, град.

При моделировании поворота вагона в диапазоне от 0 до 10° установлено, что сила, действующая вдоль железнодорожного пути, увеличивается на 2–17 %. Указанная сила в рассматриваемом интервале значений увеличивается с ростом угла

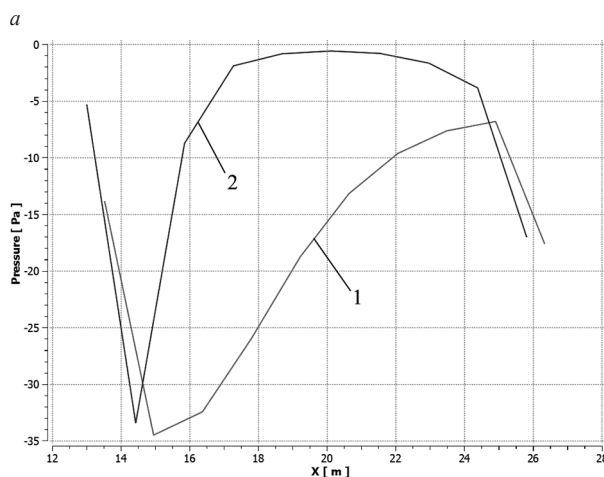
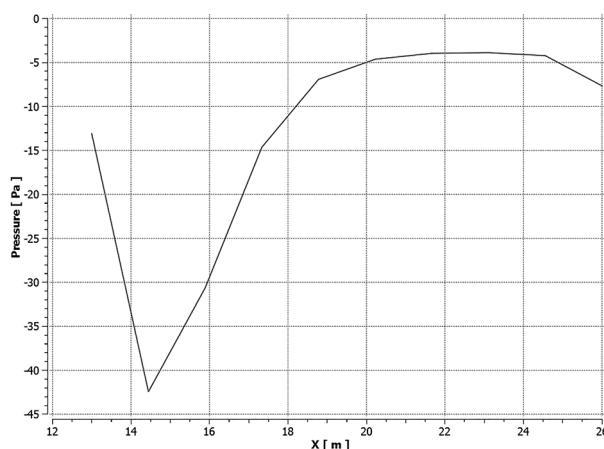


Рисунок 3 — Графики распределения давления на боковой поверхности на высоте 1,75 м от основания вагона при углах атаки 0° (a) и 10° (b): линии 1 и 2 соответствуют поверхностям, указанным аналогичными цифрами на рисунке 1 b
Figure 3 — Graphs of pressure distribution on the lateral surface at a height of 1.75 m from the car base at attack angles of 0° (a) and 10° (b): lines 1 and 2 correspond to the surfaces indicated by similar figures in Figure 1 b

между осью пути и вектором скорости ветра. Такая ситуация связана с действием на боковые стенки вызванных потоком воздуха касательных напряжений.

На основании полученных значений определены значения коэффициента аэродинамического сопротивления C_x , который вычисляется по формуле [9]:

$$C_x = \frac{2F}{\rho v^2 A},$$

где F — значение силы, действующей на тело при обтекании его воздухом, Н; ρ — плотность воздуха, кг/м³; v — скорость потока воздуха, м/с; A — площадь поперечного сечения обтекаемого тела, м².

На рисунке 6 представлена зависимость аэродинамического коэффициента от угла между осью пути и вектором скорости ветра.

Из рисунка 6 видно, что с увеличением угла атаки аэродинамический коэффициент возрастает нелинейно. Наблюдаемое увеличение коэффициента

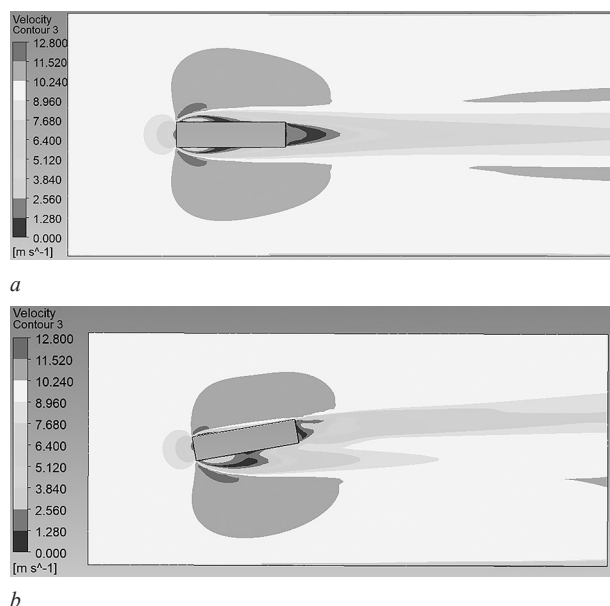


Рисунок 4 — Распределение скоростей потока в сечении расчетной области на высоте 1,75 м от основания вагона при углах атаки 0° (a) и 10° (b)

Figure 4 — Flow velocity distribution in the cross-section of the design area at a height of 1.75 m from the car base at attack angles of 0° (a) and 10° (b)

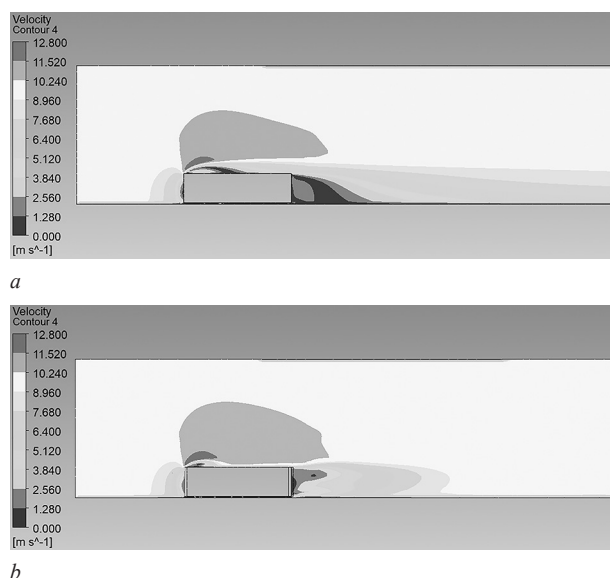


Рисунок 5 — Распределение скоростей потока в сечении расчетной области, параллельном оси железнодорожного пути при углах атаки 0° (a) и 10° (b)

Figure 5 — Flow velocity distribution in the cross-section of the design area parallel to the railroad track axis at attack angles of 0° (a) and 10° (b)

ента аэродинамического сопротивления на 20 %, полученное по результатам расчета, соответствует экспериментальным значениям, полученным ранее при натурных испытаниях вагонов [15, 16].

Заключение. Разработанная методика компьютерного моделирования обтекания вагона потоком воздуха при отклонении его направления от оси пути может быть использована для анализа аэродинамических сил, действующих как на вагоны и локомотивы, так и на тентованные

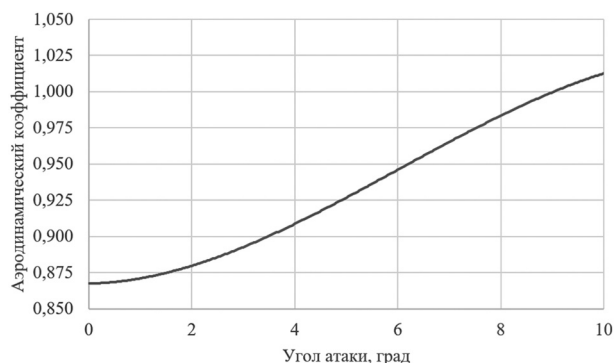


Рисунок 6 — Зависимость аэродинамического коэффициента от угла атаки

Figure 6 — Dependence of aerodynamic coefficient on attack angle

и фургонные полуприцепы, используемые на автомобильном транспорте.

Дальнейшая детализация модели железнодорожного вагона позволит установить уточненные значения коэффициентов воздушного сопротивления для различных типов железнодорожных вагонов при разных направлениях движения воздушного потока. Результаты могут быть использованы при определении ветровой нагрузки для расчетов норм закрепления подвижного состава на станционных путях и уточнения режима ведения поездов, состоящих из вагонов различного типа.

Список литературы

1. Чурков, Н.А. Влияние воздушной среды на поезд / Н.А. Чурков, А.А. Битюцкий, В.А. Кручек // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. — 2013. — № 2 (35). — С. 20–26.
2. Design and simulation of heavy haul locomotives and trains / M. Spiryagin [et al.]. — Boca Raton: CRC Press, 2016. — 447 p. — DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315369792>.
3. Cross-wind effects on road and rail vehicles / C. Baker [et al.] // Vehicle system dynamics. — 2009. — Vol. 47, iss. 8. — Pp. 983–1022. — DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110903078794>.
4. Baker, C.J. A review of train aerodynamics Part 1 – Fundamentals / C.J. Baker // The Aeronautical Journal. — 2014. — Vol. 118, iss. 1201. — Pp. 201–228. — DOI: <https://doi.org/10.1017/S000192400000909X>.
5. 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. 2. — Pp. 1–10.
6. Kedare, S.B. Computational fluid dynamics analysis of empty railway freight wagons / S.B. Kedare, S.C. Sharma, S.P. Harsha // International Journal of Vehicle Structures and Systems. — 2015. — Vol. 7, no. 1. — Pp. 25–30. — DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.7.1.05>.
7. Paul, J.C. Application of CFD to rail car and locomotive aerodynamics / J.C. Paul, R.W. Johnson, R.G. Yates // The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. — 2009. — Pp. 259–297. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_25.
8. An experimental analysis of the aerodynamic characteristics of a high-speed train on a bridge under crosswinds / M. Wang [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2018. — Vol. 177. — Pp. 92–100. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.021>.
9. Effects of different aerodynamic configurations on cross-wind stability of a conventional train / C.E.A. Reyes [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2023. — Vol. 242. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105588>.
10. Гребнев, И.А. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд / И.А. Гребнев, О.Е. Пудовиков // Изв. Транс-сба. — 2022. — № 4(52). — С. 13–22.

11. Демьянчук, О.В. Моделирование обтекания потоком воздуха прямоугольного параллелепипеда / О.В. Демьянчук // Механика. Исследования и инновации. — 2023. — Вып. 16. — С. 64–72.
12. Молчанов, А.М. Математическое моделирование задач газодинамики и теплообмена / А.М. Молчанов. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 208 с.
13. Гегедеш, М.Г. Анализ подходов к определению эффективности демпфирования колебаний жидких грузов в транспортных резервуарах с перегородками / М.Г. Гегедеш // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2022. — Вып. 11. — С. 208–213.
14. Shimanovsky, A.O. Dynamics of tank trucks with baffles for transportation of viscous liquids / A.O. Shimanovsky, M.G. Kuzniatsova, V.I. Yakubovich // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. — 2018. — Vol. 7, no. 4. — Pp. 438–443. — DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.438-443>.
15. Луговцов, М.Н. Проектирование сортировочных горок: пособие / М.Н. Луговцов, В.Я. Неррей. — Гомель: БелГУТ, 2005. — 170 с.
16. Демьянчук, О.В. Анализ влияния ветровой нагрузки на закрепление железнодорожных составов станционными тормозными башмаками / О.В. Демьянчук // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. — 2021. — № 2(43). — С. 58–61.

SHIMANOVSKY Alexander O., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department “Technical Physics and Theoretical Mechanics”¹

E-mail: tm.belsut@gmail.com

DZEMYANCHUK Volha U.

Postgraduate Student of the Department “Technical Physics and Theoretical Mechanics”¹

E-mail: olga.demyanchuk.98@mail.ru

¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 28 March 2024.

RAILWAY FREIGHT CAR MODEL AERODYNAMICS AT DIFFERENT AIRFLOW ATTACK ANGLES

The problem solution is considered for an airstream flow around a rectangular parallelepiped railway car model. The results of computer modeling in ANSYS CFX software system of air flow aerodynamics at its deviation from the longitudinal axis of the car are given. The k - ε turbulence model is used to close the Navier–Stokes equations averaged by Reynolds. The distribution diagrams of the flow velocities and pressures on the frontal and side surfaces of the vehicle are obtained. The values of aerodynamic drag coefficients of the car depending on the attack angle are determined. It is shown that when the attack angle increases from 0 to 10°, the aerodynamic coefficient changes nonlinearly, and this increase corresponds to the experimental values. The developed numerical modeling technique makes it possible to analyze the airflow around both railways rolling stock and automobiles.

Keywords: aerodynamics, airstream flow, computer modeling, aerodynamic coefficient

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-23-29>

References

1. Churkov N.A., Bityutskiy A.A., Kruchek V.A. Vliyanie vozduшной sredy na poezd [The air influence on the train]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2013, iss. 2(35), pp. 20–26 (in Russ.).
2. Spiriyagin M., Wolfs P., Cole C., Spiriyagin V., Sun Y.Q., McSweeney T. *Design and simulation of heavy haul locomotives and trains*. Boca Raton, CRC Press, 2016. 447 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315369792>.
3. Baker C., Cheli F., Orellano A., Paradot N., Proppe C., Rocchi D. Cross-wind effects on road and rail vehicles. *Vehicle system dynamics*, 2009, vol. 47, iss. 8, pp. 983–1022. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110903078794>.
4. Baker C.J. A review of train aerodynamics Part 1 – Fundamentals. *The aeronautical journal*, 2014, vol. 118, iss. 1201, pp. 201–228. DOI: <https://doi.org/10.1017/S000192400000909X>.
5. Ramlan I., Darlis N. Comparison between Solidworks and Ansys flow simulation on aerodynamic studies. *Journal of design for sustainable and environment*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 1–10.
6. Kedare S.B., Sharma S.C., Harsha S.P. Computational fluid dynamics analysis of empty railway freight wagons. *International journal of vehicle structures and systems*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.7.1.05>.
7. 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, pp. 259–297. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_25.
8. Wang M., Li X.-Z., Xiao J., Zou Q.-Y., Sha H.-Q. An experimental analysis of the aerodynamic characteristics of a high-speed train on a bridge under crosswinds. *Journal of wind engineering*

- and industrial aerodynamics, 2018, vol. 177, pp. 92–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.021>.
9. 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, vol. 242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105588>.
 10. Grebnev I.A., Pudovikov O.E. K otsenke vliyaniya vetrovoy nagruzki na gruzovoy poezd [On the estimation of the influence of wind load on a freight train]. *Journal of Transsib railway studies*, 2022, no. 4(52), pp. 13–22 (in Russ.).
 11. Dzemyanchuk V.U. Modelirovanie obtekaniya potokom vozdukhа pryamougolnogo paralelepipedа [Modeling of air flow around a rectangular parallelepiped]. *Mechanics. Researches and innovations*, 2023, vol. 16, pp. 64–72 (in Russ.).
 12. Molchanov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie zadach gazodinamiki i teplomassoobmena* [Mathematical modeling of gas dynamics and heat and mass transfer problems]. Moscow, MAI Publ., 2013. 208 p. (in Russ.).
 13. Gegedesh M.G. Analiz podkhodov k opredeleniyu effektivnosti dempfirovaniya kolebaniy zhidkikh gruzov v transportnykh rezervuarakh s peregorodkami [Analysis of approaches to determining the efficiency of liquid cargo oscillations damping in transport reservoirs with baffles]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2022, iss. 11, pp. 208–213 (in Russ.).
 14. 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, vol. 7, no. 4, pp. 438–443. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.438-443>.
 15. Lugovtsov M.N., Negrey V.Ya. *Proektirovanie sortirovochnykh gorok* [Design of sorting humps]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2005. 170 p. (in Russ.).
 16. Dzemyanchuk V.U. Analiz vliyaniya vetrovoy nagruzki na zakreplenie zheleznodorozhnykh sostavov stantsionnymi tormoznymi bashmakami [Analysis of the wind load influence on rolling stocks fixing by station brake shoes]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2021, no. 2(43), pp. 58–61 (in Russ.).