

УДК 533.6.011:004.94

*О. В. ДЕМЬЯНЧУК*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ СЦЕПА ВАГОНОВ-ХОППЕРОВ**

В программном комплексе ANSYS Fluent выполнено компьютерное моделирование обтекания воздушным потоком отцепа, включающего два вагона-хоппера. Получены картины распределения давлений на лобовой и боковой поверхностях вагонов. Анализ схем распределения скоростей потока показал наличие завихрений в межвагонном пространстве, непосредственно за хвостовым вагоном, также у боковых поверхностей первого вагона отцепа. Определены аэродинамические силы и значения коэффициентов аэродинамического сопротивления вагонов.

**Ключевые слова:** аэродинамика, конечно-элементное моделирование, обтекание потоком воздуха, аэродинамический коэффициент.

В настоящее время существует необходимость определения действующих на железнодорожный подвижной состав сил, в том числе и аэродинамических, с учетом особенностей конструкции различных типов вагонов. Авторы [1] отмечают, что аэродинамическое сопротивление составляет значительную долю от общего сопротивления подвижного состава, варьируясь от относительно небольших значений при низких скоростях до более чем 50 % при скоростях, превышающих 100 км/ч. Поэтому в существующих условиях с развитием цифровизации процессов при эксплуатации транспортных средств важно учитывать аэродинамические особенности конструкции подвижного состава. Анализ аэродинамики транспортных средств может выполняться на основе проведения испытаний (как натуральных, так и в аэродинамической трубе), а также с использованием компьютерного моделирования. Последний способ обеспечивает получение результатов с достаточной степенью точности, а также позволяет снизить стоимостные и временные затраты по сравнению с другими методами.

Так, на основе исследований авторами [3] обтекания воздушным потоком высокоскоростного поезда, выполненных в соответствии со стандартом EN 14067-6:2010 [2], было установлено, что при условии верификации модели на основе экспериментальных данных CFD-моделирование (CFD – Computational Fluid Dynamics) позволяет определять аэродинамические характеристики поездов (аэродинамические силы, коэффициент аэродинамического сопротивления и др.) с высокой степенью точности.

Сравнение результатов компьютерного моделирования обтекания воздушным потоком поезда с испытаниями в аэродинамической трубе, выполненное в работе [4], показало, что численное моделирование позволяет получить

достоверные результаты, предоставляя возможность перехода к анализу полноразмерного поезда. Также авторами [4] установлено, что изменение высоты пантографа оказывает незначительное влияние на аэродинамическое сопротивление движению поезда при различных его конфигурациях.

С учетом повышения скорости движения поездов и требованиям к обеспечению их энергоэффективности возникает необходимость исследования аэродинамики грузовых поездов. Так, результаты численных расчетов аэродинамики воздушного потока вокруг загруженной контейнером платформы с учетом исследования возможностей применения различных способов моделирования турбулентности представлены в работе [5]. Авторами установлено хорошее согласование полученных аэродинамических характеристик с результатами экспериментов в аэродинамической трубе, что позволило в дальнейшем рассмотреть состав поезда, включающий несколько платформ, загруженных контейнерами.

Выполненное в работе [6] исследование влияния бокового ветра на контейнерный поезд показало, что при перевозке контейнеров на платформах необходимо учитывать их аэродинамические характеристики для обеспечения устойчивости вагона и надежности крепления контейнера, особенно при значительных углах атаки ветрового потока. По результатам компьютерного моделирования с учетом различных вариантов конфигурации поезда (учитывались различные схемы загрузки платформ и ветровые условия) авторами [7] установлены коэффициенты аэродинамического сопротивления рассматриваемого подвижного состава.

В работе [8] выполнено исследование обтекания воздушным потоком поезда, включающего от 10 до 14 полувагонов, на основе компьютерного моделирования, а также испытаний в аэродинамической трубе, которые позволили верифицировать разработанную модель. Авторами [8] установлено, что аэродинамические характеристики вагонов, располагаемых в середине состава, практически не зависят от общего количества вагонов. Таким образом, при дальнейших исследованиях целесообразно рассматривать состав из шести вагонов, что позволяет сократить продолжительность вычислений при компьютерном моделировании и использовать модели большего масштаба при испытаниях в аэродинамической трубе, сохранив достоверность вычислений.

Методика анализа аэродинамических характеристик полувагонов с помощью компьютерного моделирования, разработанная в исследовании [9], позволила установить значения сил аэродинамического сопротивления движению поезда, а также получить картины распределения давлений на вагоны состава в груженом и порожнем состояниях. Расхождение полученных результатов с данными экспериментов не превысило 15 %.

Анализ влияния конфигурации состава грузового поезда на его аэродинамические характеристики, выполненный в работе [10], позволил установить, что наименьшее аэродинамическое сопротивление обеспечивается при следующем варианте расположения вагонов в составе: крытый вагон, платформа,

вагон-цистерна. Наихудшим вариантом является следующий порядок вагонов: платформа, крытый вагон, вагон-цистерна.

В работе [11] было выполнено исследование влияния бокового ветра на аэродинамические характеристики состава поезда, включающего крытый вагон, полувагон и цистерну (при этом угол атаки рассматривался в диапазоне от 0 до 40°). Результаты компьютерного моделирования показали, что изменение схемы формирования поезда оказывает значительное влияние величину боковой силы, что необходимо учитывать для обеспечения боковой устойчивости состава. Также авторами установлено, что изменение аэродинамического сопротивления при различных схемах формирования поезда может достигать 20,5 %.

Влияние конфигурации состава на аэродинамические силы, воздушный поток и его топологию рассмотрено в работе [1]. Исследование проводилось для составов поездов, включающих 5, 7, 9 и 11 вагонов. Достоверность численных результатов была подтверждена сравнением с результатами испытаний в аэродинамической трубе. Результаты моделирования показали, что конфигурация поезда не оказывает существенного влияния на аэродинамическое сопротивление промежуточных грузовых вагонов, однако наблюдается снижение аэродинамического сопротивления хвостового вагона с увеличением длины состава. Также увеличение длины состава усиливает интенсивность воздушного потока, но не влияет на максимальные значения его скорости. Установлено, что для более коротких составов поездов характерен более высокий уровень турбулентности.

Ранее в работе [12] нами был выполнен анализ обтекания воздушным потоком одиночных вагонов различных типов. Целью данной работы стало исследование обтекания сцепы из двух вагонов-хопперов для перевозки цемента.

На рисунке 1 представлена геометрическая модель, включающая расчетную область и вагоны-хопперы упрощенной конструкции.

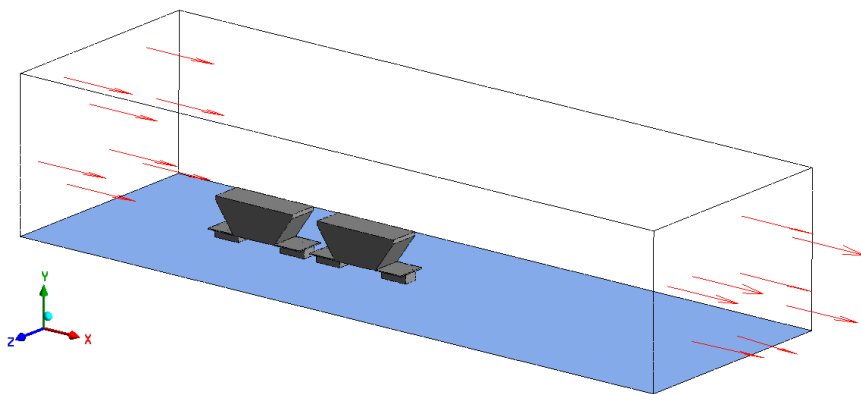


Рисунок 1 – Компьютерная модель расчетной области с вагонами-хопперами

По результатам выполненных ранее расчетов [13] было установлено, что расхождения в результатах моделирования при использовании модулей CFX и Fluent не превышают 7 %. В данном исследовании моделирование обтекания воздушным потоком вагонов выполнено с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Размеры расчетной области (длина – 80 м, ширина – 30 м, высота – 16 м) были определены на основании обеспечения получения достоверных результатов с учетом минимизации продолжительности вычислений.

Граничные условия задавались аналогично представленным в работе [14], за исключением боковых и верхней поверхностей расчетной области, для которых в модуле Fluent задавалось условие жесткой стенки Wall. Исходными параметрами расчета приняты: тип среды – воздух с температурой 288 К; давление – 100 кПа; плотность –  $1,225 \text{ кг/м}^3$ ; вязкость –  $1,831 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$  [12].

По результатам компьютерного моделирования получены распределения давления на лобовых (рисунок 2) и боковых (рисунок 3) поверхностях вагонов.

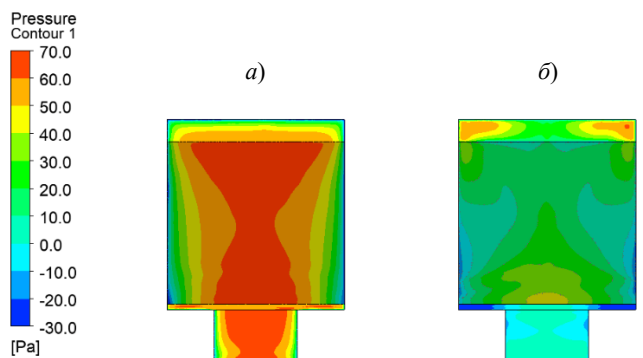


Рисунок 2 – Распределение давления на лобовых поверхностях вагонов:  
*a* – первого по ходу движения; *б* – второго

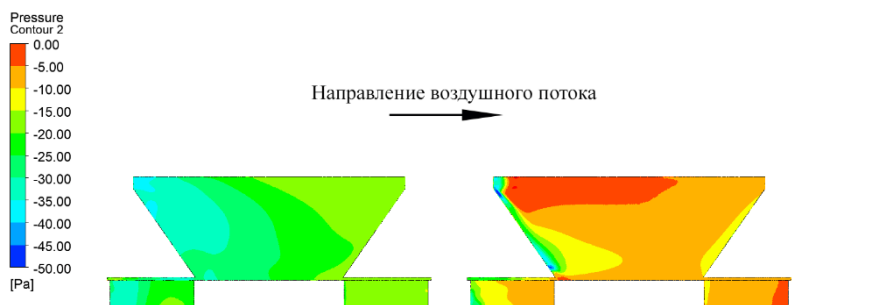


Рисунок 3 – Распределение давления на боковых поверхностях вагонов

На лобовой поверхности первого по ходу движения вагона-хоппера значения давлений заметно выше и достигают 70 Па. Для второго вагона давления имеют более низкие значения, при этом максимальное давление наблюдается в верхней части конструкции. На боковой поверхности обоих вагонов наблюдается зона отрицательных избыточных давлений (см. рисунок 3), причем в верхней части второго по ходу движения вагона значения давлений близки к нулю. Такое распределение давлений связано с наличием завихрений, которые хорошо заметны на рисунке 4. Возле первого вагона четко прослеживается зона отрывного течения.

Из картин линий тока, представленных на рисунке 5, видно наличие завихрений в межвагонном пространстве, а также непосредственно за хвостовым вагоном. Таким образом, позади первого и второго вагонов наблюдаются зоны с отрывным течением.

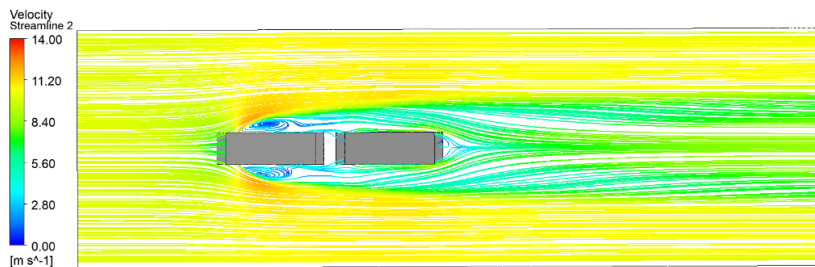


Рисунок 4 – Распределение скоростей потока в горизонтальном сечении расчетной области

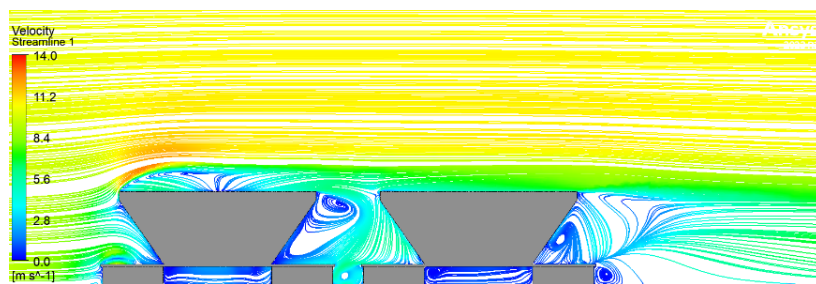


Рисунок 5 – Распределение скоростей потока в сечении расчетной области, параллельном оси железнодорожного пути

В соответствии с [15] коэффициент аэродинамического сопротивления

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

где  $F$  – значение силы, действующей на тело при обтекании его воздухом, Н;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость потока воздуха, м/с;  $A$  – наибольшая площадь поперечного сечения вагона-хоппера, м<sup>2</sup>.

Значения аэродинамических сил, действующих на вагоны, и коэффициента аэродинамического сопротивления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Аэродинамические характеристики вагонов-хопперов

Вагон	Сила сопротивления, Н	Аэродинамический коэффициент	Подъемная сила, Н
Первый вагон сцепа	736,77	0,953	164,67
Второй вагон сцепа	393,57	0,510	–43,30
Одиночный вагон	679,66	0,880	109,52

Сравнение результатов с полученными значениями для одиночного вагона показывает, что силы аэродинамического сопротивления первого вагона сцепа и одиночного отличаются незначительно (для одиночного данное значение ниже на 8 %), однако значение подъемной силы увеличилось по сравнению с одиночным практически на 50 %. Для второго вагона в сцепе аэродинамические силы снижены более чем на 40 %, а вертикальная сила вместо подъемной стала прижимающей к поверхности земли.

Результаты, полученные на основе разработанной методики компьютерного моделирования обтекания вагонов потоком воздуха, достаточно хорошо согласуются с данными натурных испытаний [16]. Они могут быть использованы при автоматизации эксплуатации железнодорожного подвижного состава и оценке энергоэффективности грузовых перевозок. Также возможно использование представленной методики для анализа аэродинамики других транспортных средств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 A numerical study on the aerodynamics of express boxcars with different marshalling configurations / D. Zhou, C. Xia, H. Chen, S. Meng // Alexandria Engineering Journal. – 2025. – Vol. 133. – P. 638–652.
- 2 EN 14067–6:2018+A1:2022. Railway applications – Aerodynamics – Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment. – Publication Date 20.07.2022. – 140 p.
- 3 Computational fluid dynamics simulation of rail vehicles in crosswind: Application in norms and standards / M. Sima, S. Eichinger, A. Blanco, I. Ali // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2015. – Vol. 229, is. 6. – P. 635–643.
- 4 Experimental and numerical evaluation of the aerodynamic drag for different configuration of a conventional train / F. Moro, C. Somaschini, D. Rocchi [et al.] // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications. – 2024. – 4 p.
- 5 Maleki, S. Assessment of various turbulence models (ELES, SAS, URANS and RANS) for predicting the aerodynamics of freight train container wagons / S. Maleki, D. Burton, M. C. Thompson // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2017. – Vol. 170. – P. 68–80.
- 6 Giappino, S. High-speed freight trains for intermodal transportation: Wind tunnel study on the aerodynamic coefficients of container wagons / S. Giappino, S. Melzi, G. Tomasini // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2018. – Vol. 175. – P. 111–119.

7 A field study on the aerodynamics of freight trains with different stacking configurations / A. Quazi, T. Crouch, J. Bell [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2023. – Vol. 232. – Article 105245. – 19 p.

8 **Golovanevskiy, V. A.** On the optimal model configuration for aerodynamic modeling of open cargo railway train / V. A. Golovanevskiy, V. V. Chmovzh, Y. V. Girka // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2012. – Vol. 107. – P. 131–139.

9 **Бороненко, Ю. П.** Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях / Ю. П. Бороненко, Б. О. Поляков, Т. М. Белгородцева // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 3 (94). – С. 57–61.

10 Effect of the formation type with different freight vehicles on the train aerodynamic performance / X. Huo, T. Liu, Z. Chen [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2022. – Vol. 60, is. 11. – P. 3868–3896.

11 The effect of different marshalling forms on the aerodynamic performance of the freight train under crosswind / Z. Xie, Z. Wu, L. Zhu, W. Ding // Archives of Transport. – 2021. – Vol. 59, is. 3. – P. 57–71.

12 **Демьянчук, О. В.** Компьютерное моделирование обтекания воздушным потоком вагонов различных типов / О. В. Демьянчук // Актуальные вопросы машиноведения. – 2025. – Т. 14. – С. 247–250.

13 **Демьянчук, О. В.** Влияние граничных условий на результаты моделирования обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона / О. В. Демьянчук // Современные проблемы машиноведения: сб. науч. тр. : в 2 ч. / ГГТУ им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 113–117.

14 **Демьянчук, О. В.** Моделирование обтекания вагона-хоппера потоком воздуха / О. В. Демьянчук // Механика. Исследования и инновации. – 2024. – № 17. – С. 49–56.

15 Effects of different aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train / C. E. A. Reyes, D. Rocchi, G. Tomasini [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2023. – Vol. 242. – Article 105588.

16 Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. – М. : Транспорт, 1992. – 104 с.

*V. U. DZEMYANCHUK*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **SIMULATION OF AN AIR FLOW AROUND A COUPLE OF HOPPER CARS**

Computer simulation of an air flow around two hopper railway cars is performed in the ANSYS Fluent software package. Pressure distribution diagrams are obtained on the frontal and side surfaces of the cars. Analysis of the flow velocity distribution diagrams shows the presence of vortex in the intercar space, directly behind the rear-end car. Vortexes are also observed near the side surfaces of the first car. The aerodynamic drag coefficients of the cars are determined based on the established aerodynamic forces.

**Keywords:** aerodynamics, finite element modeling, streamline by airflow, aerodynamic coefficient.

Получено 29.10.2025