УДК 533.6.011:004.94

О. В. ДЕМЬЯНЧУК Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВАГОНА-ХОППЕРА ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Выполнено компьютерное моделирование обтекания воздушным потоком вагонахоппера в программном комплексе ANSYS CFX. Получены картины распределения давлений на лобовой и боковой поверхностях вагона. Определены значения коэффициентов аэродинамического сопротивления. Установлено, что изменение угла наклона торцевых стенок не оказывает существенного влияния на аэродинамические характеристики вагона-хоппера.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, аэродинамика, аэродинамический коэффициент.

В существующих условиях эксплуатации железнодорожного подвижного состава требуется определять действующие на него силы, в том числе и аэродинамические, с учетом особенностей конструкции различных типов вагонов. Исследование аэродинамики поездов и вагонов выполняется с использованием различных методов: проведение натурных экспериментов, испытаний в аэродинамической трубе, моделирование на основе технологии вычислительной гидродинамики. Численное моделирование является наиболее перспективным методом, так как позволяет избежать сложностей, возникающих при использовании других методов (высокая стоимость, сложность проведения, необходимость дополнительной обработки результатов исследования).

Существует большое количество исследований, посвященных аэродинамике пассажирских поездов. В работе [1] проанализирована форма носовой части высокоскоростного поезда с целью минимизации коэффициента лобового сопротивления и получено, что оптимальная конструкция при удлинении носовой части и уменьшении угла наклона крыши снижает коэффициент лобового сопротивления на 32,5 % по сравнению с исходной геометрией. В работе [2] установлено, что коэффициент подъемной силы, найденный по результатам моделирования обтекания воздушным потоком пассажирского поезда, соответствует результатам испытаний в аэродинамической трубе, однако коэффициент боковой силы принимает большие значения по сравнению с полученным при испытаниях, что может быть обусловлено использованием упрощенной модели.

В последнее время возникает потребность в исследовании аэродинамики грузовых поездов в связи с повышением их скорости движения и необходимостью повышения энергоэффективности грузовых перевозок (при скорости грузового поезда 120 км/ч его аэродинамическое сопротивление составляет более 40 % от общей силы лобового сопротивления [3] и соответственно приводит к значительному потреблению энергии).

Авторами [4] исследуется воздействие бокового ветра на грузовой поезд, состоящий из платформ, загруженных контейнерами. По результатам испытаний в аэродинамической трубе установлено, что аэродинамические коэффициенты сильно влияют на устойчивость поезда и надежность крепления самого контейнера.

Оценка аэродинамических характеристик контейнеров, погруженных на платформы представлена в [5, 6]. Распределения давления на передней и задней поверхностях контейнеров при проведении натурных испытаний в условиях слабого ветра получены в работе [5]. Установлено, что результаты хорошо согласуются с картинами распределения, полученными при проведении испытаний в аэродинамической трубе, а также при моделировании. В работе [6] определены коэффициенты аэродинамического сопротивления при различных конфигурациях загрузки открытого подвижного состава, положениях контейнеров и ветровых условиях.

В статье [7] представлена оценка возможностей применения различных подходов к моделированию турбулентности (ELES, SAS, URANS и RANS) для прогнозирования аэродинамики воздушного потока вокруг загруженной контейнером одиночной платформы, а также при ее следовании в составе поезда. Сравнение полученных результатов с данными испытаний в аэродинамической трубе показало, что моделирование позволяет получить необходимые аэродинамические характеристики исследуемых объектов с достаточной степенью точности.

Исследование возможностей снижения аэродинамического сопротивления вагонов-цистерн выполнено в работе [8]. Результаты испытаний, которые проведены в аэродинамической трубе для поезда, состоящего из вагонов-цистерн, показали, что изменение геометрии вагонов (модификация радиуса торцевой поверхности и др.), а также использование дополнительных устройств позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление до 30 %.

Большинство исследований аэродинамики грузовых поездов выполнялось для составов из однотипных вагонов. Тем не менее в большинстве случаев грузовые поезда имеют в составе вагоны разных типов. В работе [9] выполнено моделирование аэродинамики поезда, включающего крытый вагон, цистерну и платформу, загруженную контейнерами в два яруса, и определены аэродинамические коэффициенты сопротивления и подъемной силы. Установлено, что наибольшее сопротивление характерно для следующего случая расположения вагонов: платформа с контейнерами, крытый вагон, цистерна, наименьшее – крытый вагон, платформа с контейнерами, цистерна. Данные, полученные при испытаниях в аэродинамической трубе, хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Исследование влияния свойств транспортного средства, в том числе геометрических, механических и аэродинамических, на риск схода с рельсов при воздействии бокового ветра, выполнен в работе [10]. Установлено, что увеличение массы кузова приводит к росту стабилизирующих сил вертикального контакта колеса с рельсом и, следовательно, к лучшей устойчивости транспортного средства. Аэродинамические характеристики последнего (аэродинамические коэффициенты боковой и подъемной сил) оказывают сильное влияние на устойчивость поезда при боковом ветре. Результаты показали, что снижение аэродинамических коэффициентов на 40 % может привести к 30%-му улучшению характеристик транспортного средства с точки зрения риска опрокидывания.

Авторами [11, 12] проанализирована возможность опрокидывания высокоскоростного грузового поезда при воздействии бокового ветра. Установлено, что максимальная скорость рассматриваемого поезда должна быть ограничена в зависимости от загрузки вагонов, а для полностью загруженного поезда максимальная скорость может составлять 305 км/ч при скорости бокового ветра 20 м/с. Понижение центра тяжести загруженных вагонов позволит снизить риск опрокидывания при воздействии сильного бокового ветра. Авторами [12] установлено, что наименее подвержены риску опрокидывания вагоны, расположенные в хвосте поезда. На основе результатов моделирования выполнено прогнозирование коэффициента опрокидывания и создана модель оптимизации размещения груза в вагоне.

Целью представленной работы стало исследование в программном комплексе ANSYS CFX обтекания потоком воздуха вагона-хоппера для перевозки цемента.

Разработана геометрическая модель, включающая расчетную область и вагон-хоппер упрощенной конструкции, которая приведена на рисунке 1. Моделирование выполнялось при условиях, представленных в работе [13] (скорость воздушного потока на входе составляла 10 м/с, давление на выходе принято равным нулю). Стенки расчетной области полагались проницаемыми.



Рисунок 1 – Геометрическая модель с расчетной областью и вагоном-хоппером

При использовании метода конечных объемов на основе тетраэдральных элементов сгенерирована сетка, которая включала 7 млн ячеек. Численное решение выполнялось на основе решения уравнения неразрывности и осреднённых по Рейнольдсу уравнений изменения количества движения Навье – Стокса, для замыкания которых использовалась модель турбулентности *k*-*ε*.

По результатам моделирования получены распределения давлений на поверхностях вагона-хоппера (рисунок 2). Максимальные значения наблюдаются на боковой поверхности в верхней части кузова вагона.





Распределения скоростей воздушного потока в различных сечениях расчетной области приведены на рисунках 3 и 4. Из рисунков видно, что на высотах, соответствующих расположению тележек и нижней части кузова, наблюдается образование вихрей за хвостовой частью вагона. Также для данных сечений значительно шире область возмущения воздушного потока.





В отличие от выполненного ранее исследования крытого вагона [13], для вагона-хоппера наблюдаются существенные изменения распределения давлений на лобовой и боковой поверхностях вагона в зависимости от высоты рассматриваемого сечения.

Из рисунка 5, а видно, что для первой по направлению воздушного потока тележки значение давления резко возрастает до 60 H, в то время как для

второй тележки оно меняется незначительно. Давление в сечении на высоте 1 м, что соответствует положению рамы вагона, резко возрастает от 0 до 75 H, в центральной части уменьшается до 45 H. Распределение давлений на лобовой поверхности кузова (рисунок 5, δ), симметричное относительно продольной оси вагона, практически идентично для всех рассматриваемых сечений.



Рисунок 4 – Распределение скоростей потока в сечении расчетной области на высоте 0,5 м (*a*), 1,5 м (*б*) и 4,2 м (*в*) от основания вагона

Распределение давлений на боковой поверхности показало, что в области первой по направлению воздушного потока тележки давление изменяется в диапазоне от 60 до 15 Па (рисунок 6, *a*), в то время как на второй тележке значение давления невелико и изменяется менее чем на 3,5 Па (рисунок 6, δ). На боковых поверхностях кузова (рисунок 6, *в*, *г*) максимальные значения

давления наблюдаются в верхней части наклонной стенки (на высоте около 4,2 м от основания вагона). На высотах 3, 1,5 и 1 м от основания вагона изменение давлений происходит более плавно, причем максимумы давлений отличаются незначительно.



Рисунок 5 – Распределение давлений на лобовой поверхности на высотах: *a* – 0,5 м для тележек: *l* – передней, *2* – задней; *б* – линия *l* – 1,5 м, 2 – 3 м, 3 – 4,2 м



Рисунок 6 – Распределение давлений на боковой поверхности на высотах: a - 0.5 м для передней тележки; $\delta - 0.5$ м для задней тележки; e - 1 м; e - линия 1 - 1.5 м, 2 - 3 м, 3 - 4.2 м

Также выполнен анализ влияния угла наклона торцевых стенок вагонахоппера на его аэродинамические характеристики, для чего выполнено моделирование обтекания воздушным потоком таких вагонов при углах наклона торцевых стенок от 50 до 60°.

Значения коэффициента аэродинамического сопротивления рассчитывались по формуле [14]

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

где F – значение силы, действующей на тело при обтекании его воздухом, H; ρ – плотность воздуха, кг/м³; v – скорость потока воздуха, м/с; A – наибольшая площадь поперечного сечения вагона-хоппера, м².

В таблице 1 приведены полученные в результате компьютерного моделирования значения сил лобового сопротивления, действующих на вагоны при разных углах наклона торцевых стенок, и соответствующие им коэффициенты аэродинамического сопротивления. Полученные значения сил хорошо согласуются с данными, полученными при проведении натурных испытаний [15].

| Угол наклона торцевых стенок, град | Сила сопротивления, Н | Аэродинамический коэффициент С _х |
|---------------------------------------|-----------------------|--|
| 50 | 679,240 | 0,879 |
| 55 | 679,660 | 0,880 |
| 60 | 681,549 | 0,882 |

Таблица 1 – Коэффициенты аэродинамического сопротивления при разных параметрах модели

Результаты расчетов показывают, что изменение угла наклона торцевых стенок не оказывает существенного влияния на значение коэффициента аэродинамического сопротивления.

Таким образом, разработанная в ходе исследований методика позволяет оценивать значения аэродинамических сил, действующих на вагоны вдоль железнодорожного пути, а также поперечных сил, которые могут приводить к опрокидыванию вагона при сильном боковом ветре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Munoz-Paniagua, J.** Aerodynamic drag optimization of a high-speed train / J. Munoz-Paniagua, J. García // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2020. – Vol. 204. – Article 104215. – 15 p.

2 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. – P. 92–100.

3 Investigation of bogie positions on the aerodynamic drag and near wake structure of a high-speed train / G. Gao [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2019. – Vol. 185. – P. 41–53.

4 **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.

5 A field study on the aerodynamics of freight trains / A. Quazi [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – Vol. 209. – Article 104463. – 16 p.

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

7 **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.

8 Aerodynamic drag reduction of railroad tank wagons / C. N. Nayeri [et al.] // Fluids. – 2022. – Vol. 7, is. 8. – Article 283.– 11 p.

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

10 Influence of the railway vehicle properties in the running safety against crosswinds / R. Heleno [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – Vol. 217. – Article 104732. – 15 p.

11 Correlation between cargo properties and train overturning safety for a high-speed freight train under strong winds / D. Zhang [et al.] // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2023. – Vol. 17. – Article 2221308. – 16 p.

12 Optimization of cargo distribution for high-speed freight trains to overcome strong wind conditions / D. Zhang [et al.] // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2024. – Vol. 18. – Article 2434008. – 16 p.

13 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.

14 **Sun, Z.** Research on aerodynamic optimization of high-speed train's slipstream / Z. Sun, S. Yao, G. Yang // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2020. – Vol. 14, is. 1. – P. 1106–1127.

15 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 MOVEMENT AROUND A HOPPER CAR

Computer simulation of an air flow around a hopper car was performed using the ANSYS CFX software package. Patterns of pressure distribution on the car front and side surfaces were obtained. The values of the aerodynamic drag coefficients were determined. It was found that changing the inclination angle of the end walls does not have a significant effect on the hopper car aerodynamic characteristics.

Keywords: finite element modeling, aerodynamics, aerodynamic coefficient.

Получено 12.10.2024