

УДК 004:533.682

DOI 10.17513/snt.40080

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА КОРМОВОЙ ЧАСТИ ТЕЛА АХМЕДА НА ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Катаева Л.Ю.

*Филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения»
в Нижнем Новгороде, Нижний Новгород, e-mail: kataeval2010@mail.ru*

В данной работе для численного моделирования используются уравнения Навье – Стокса с осреднением по числу Рейнольдса в сочетании с $k-\omega$ моделью турбулентности. В качестве объекта выбрано тело Ахмеда и его модификации. Моделирование загрязнения тела рассматривается только для мелкодисперсной фазы, не оказывающей существенного влияния на газовую фазу. Для моделирования динамики движения частиц и процесса их налипания на поверхность рассматриваемых тел используется модель дисперсной многофазности. Аэродинамическое взаимодействие дисперсной фазы с газовой проводилось на основе модели Schiller-Naumann, а входная граница является источником подачи частиц. Частицы рассматривались в форме шара с постоянными размерами 1, 10 и 100 мкм. В модели границы тела и земли считаются непроницаемыми для частиц, что имитирует их налипание на данные поверхности. Численное моделирование аэродинамики тела Ахмеда и его модификаций показало, что угол наклона кормовой части тела Ахмеда оказывает существенное влияние на формирование и местоположение вихревой зоны. Мелкодисперсные частицы грязи и пыли, вовлекаемые в вихревые потоки, оседают на поверхности автомобиля. При увеличении коэффициента аэродинамического сопротивления траектории шарообразных частиц приближаются к линиям тока, не пересекающимся с линиями автомобиля, и, следовательно, более крупные частицы, движущиеся под действием силы инерции и аэродинамических сил, приводят к большему налипанию частиц и его загрязнению. При удаленности крупных частиц от автомобиля они быстрее оседают на землю, не достигая его поверхности. Более мелкие частицы больше вовлекаются в вихревые потоки вблизи поверхности автомобиля, оседая на его поверхности при столкновении.

Ключевые слова: многофазность, уравнение Навье – Стокса, аэродинамика, мелкодисперсные частицы, загрязнение, тело Ахмеда, вихревые потоки, модель турбулентности

NUMERICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF THE ANGLE OF INCLINATION OF THE AHMED'S AFT BODY ON ITS POLLUTION

Kataeva L.Yu.

*Branch of the Samara State University of Railways in the city of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, e-mail: kataeval2010@mail.ru*

In this paper, the Reynolds number averaged Navier-Stokes equations coupled with the $k-\omega$ turbulence model are used for numerical modeling. The Ahmed body and its modifications are chosen as the object. The modeling of body contamination is considered only for the fine phase, which does not have a significant effect on the gas phase. A disperse multiphase model is used to model the dynamics of particle motion and the process of particle adhesion on the surface of the bodies under consideration. The aerodynamic interaction of the disperse phase with the gas phase was carried out on the basis of the Schiller-Naumann model, and the inlet boundary is the source of particle supply. The particles were considered in ball shape with constant sizes of 1 μm , 10 μm and 100 μm . In the model, the body and ground boundaries are considered permeable to particles, which simulate their adhesion to these surfaces. Numerical modeling of the aerodynamics of the Ahmed body and its modifications showed that the angle of inclination of the aft part of the Ahmed body has a significant influence on the formation and location of the vortex zone. Fine particles of dirt and dust involved in the vortex flows are deposited on the surface of the vehicle. When the aerodynamic drag coefficient increases, the trajectories of spherical particles approach the current lines that do not intersect with the lines of the car and consequently, larger particles moving under the action of inertia and aerodynamic forces lead to greater particle buildup and its contamination. When large particles are farther away from the vehicle, they settle to the ground faster without reaching its surface. Smaller particles are more involved in eddy currents near the surface of the car, settling on its surface on impact.

Keywords: multiphase, Navier – Stokes, aerodynamics, fine particles, eddy currents, turbulence model, pollution, Ahmed body

Введение

С развитием технологий численное моделирование становится незаменимым инструментом для исследования сложных физических процессов. Одним из актуальных направлений является численное моделирование загрязнения задней поверхности автомобиля, которое имеет важное практическое значение [1]. В результате загрязнения

поверхностей систем освещения автомобиля и внешних камер заднего вида затрудняется получение качественной навигационной информации [2], снижается удобство эксплуатации и ухудшается эстетический вид автомобиля. Кроме того, загрязнение внешней поверхности автомобиля приводит к преждевременному нарушению лакокрасочного покрытия, износу щеток стекло-

чистителей и в некоторых случаях приводит к разрушению стекол [3, 4].

Цель исследования – численное моделирование распределения частиц на поверхности тела Ахмеда и модификаций его кормовой части в результате изменения угла наклона последней.

В данной работе рассмотрены основные принципы и методики численного моделирования влияния угла наклона кормовой части тела на его загрязнение, а также проанализированы полученные результаты с целью выявления закономерностей и перспектив дальнейших исследований в этой области.

Материалы и методы исследования

Проблема загрязнения транспортных средств своими корнями уходит в далекие 1950-е гг. На первых порах рассматривались вопросы по защите ветровых стекол от дождя, и исследования привели к созданию встроенных систем стеклоочистителей и омывателей, а затем и к использованию дефлекторов различной конфигурации для защиты от скопления тяжелых частиц. Уже к середине 1960-х гг. были разработаны механические системы, уменьшающие загрязнение задних стекол. Большое количество работ было посвящено аэродинамике автомобиля и снижению его аэродинамического сопротивления. Для решения данной задачи привлекались различные инструменты и методики от экспериментальных, аналитических до самых современных методов моделирования на основе различных подходов. Авторы [5] использовали модель взаимодействия жидкость – твердое тело, исследовали нестационарную аэродинамику автомобиля и показали хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными. По вопросам влияния реальных дорожных с непостоянной скоростью внешнего набегающего потока возникает перекоп встречного профиля, который невозможно повторить в аэродинамической трубе и при реальных испытаниях, что ограничивает точность результатов, полученных на основе стационарных моделей [6]. Одной из пионерских работ в области численного моделирования является работа [7], где изучено загрязнение боковой части и задней части внедорожника с использованием для отслеживания траекторий частиц Лагранжева подхода, а для определения концентрации грязи – Эйлера и где утверждается, что стационарное поле течения дает результат, не отличающийся от нестационарного. В дальнейшем это утверждение было опровергнуто авторами работ [8, 9]. В работе [8] утверждается, что использование

усредненного по времени поля скоростей для прогноза траектории частицы снижает ее вероятность попадания на тело в сравнении и использованием нестационарного, а в [9] автор подчеркивает сложность моделирования взаимодействия частиц с нестационарным следом за автомобилем, и даже небольшие отличия в поле скоростей могут приводить к существенным различиям в распределении частиц на поверхности этого тела. Несмотря на большое количество работ в области моделирования аэродинамики тела и расчета аэродинамического сопротивления эта тема остается открытой: во-первых, до сих пор нет теоретических методов его расчета для сложных тел, а во-вторых, известные экспериментальные данные до сих пор недостаточно систематизированы, а попытки выявить зависимость аэродинамического сопротивления в зависимости от формы не дали результата в силу большого числа параметров геометрии и их сложных взаимосвязей [10–12]. В работе [13] с помощью математического моделирования и экспериментально выявлены аспекты определения силы аэродинамического сопротивления, которая влияет на расход топлива и динамические свойства, особенно при большой скорости. Численному моделированию взаимного аэродинамического влияния тел при движении посвящена работа [14], где показана нестационарная картина поля скоростей.

Следует сказать, что с ростом скоростей вопрос о загрязняемой поверхности автомобиля вновь выходит на первый план. Это связано, прежде всего, с необходимостью обеспечить водителю хороший обзор и видимость, а использование камер не решает данный вопрос, так как частицы пыли и грязи налипают и на них.

Постановка задачи

Для численного моделирования загрязнения кормовой части рассматриваемых тел использовались уравнения Навье – Стокса с осреднением по числу Рейнольдса в сочетании с $k-\omega$ моделью турбулентности [14]. В качестве тела выбрано тело Ахмеда и его модификации. Моделирование загрязнения тела рассматривается только для мелкодисперсной фазы, не оказывающей существенного влияния на газовую фазу [15].

Для моделирования динамики движения частиц и процесса их налипания на поверхность рассматриваемых тел используется модель дисперсной многофазности. Аэродинамическое взаимодействие дисперсной фазы с газовой проводилось на основе модели Schiller-Naumann, а источником подачи частиц являлась входная граница.

Частицы рассматривались в форме шара с постоянными размерами 1, 10 и 100 мкм. В модели границы тела и земли считаются проницаемыми для частиц, что имитирует их налипание на данные поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение

Численное моделирование осуществляется на основе модификаций тела Ахмеда – плохо обтекаемое тело со скошенной кормовой частью, поднятое над поверхностью земли на 50 мм. В каждой серии рисунков представлены результаты моделирования тела Ахмеда с кормовой частью, расположенной под различными углами: а – 10°; б – 15°; с – 20°; д – 25°; е – 30°; ф – 35°. На рис. 1 показано поле скоростей и распределение давления при обтекании тела Ахмеда и его модификаций с изменением угла наклона его кормовой части. Во всех вариантах угла наклона кормовой части тела Ахмеда хорошо видна вихревая зона, способствующая загрязнению тела. Однако наименьший вихрь сформировался у тела Ахмеда в кормовой части при угле

наклона ее 30° (рис. 1, е). По мере уменьшения угла наклона вихревая зона смещается в нижнюю часть автомобиля, а по мере увеличения угла наклона вихревая зона растет, и уже при угле наклона 25° вихревая зона распространяется и на саму наклонную плоскость, что хорошо видно из рис. 1, д. При угле в 35° наблюдается снова усиление вихревых течений в нижней части тела и, следовательно, снова начинает расти площадь, покрытая частицами.

Представляет интерес, насколько различна будет зона, покрытая частицами разного размера в зависимости от конфигурации кормовой части тела Ахмеда. На рис. 2–4 представлены серии результатов численного моделирования налипания частиц с постоянными размерами 1, 10 и 100 мкм соответственно. Линии тока показывают траектории движения частиц соответствующего размера, а их цвет – объемную долю. Цвет поверхности обтекаемого тела показывает массу частиц, налипающих на нее за единицу времени по логарифмической шкале, максимум которой соответствует значению невозмущенного потока.

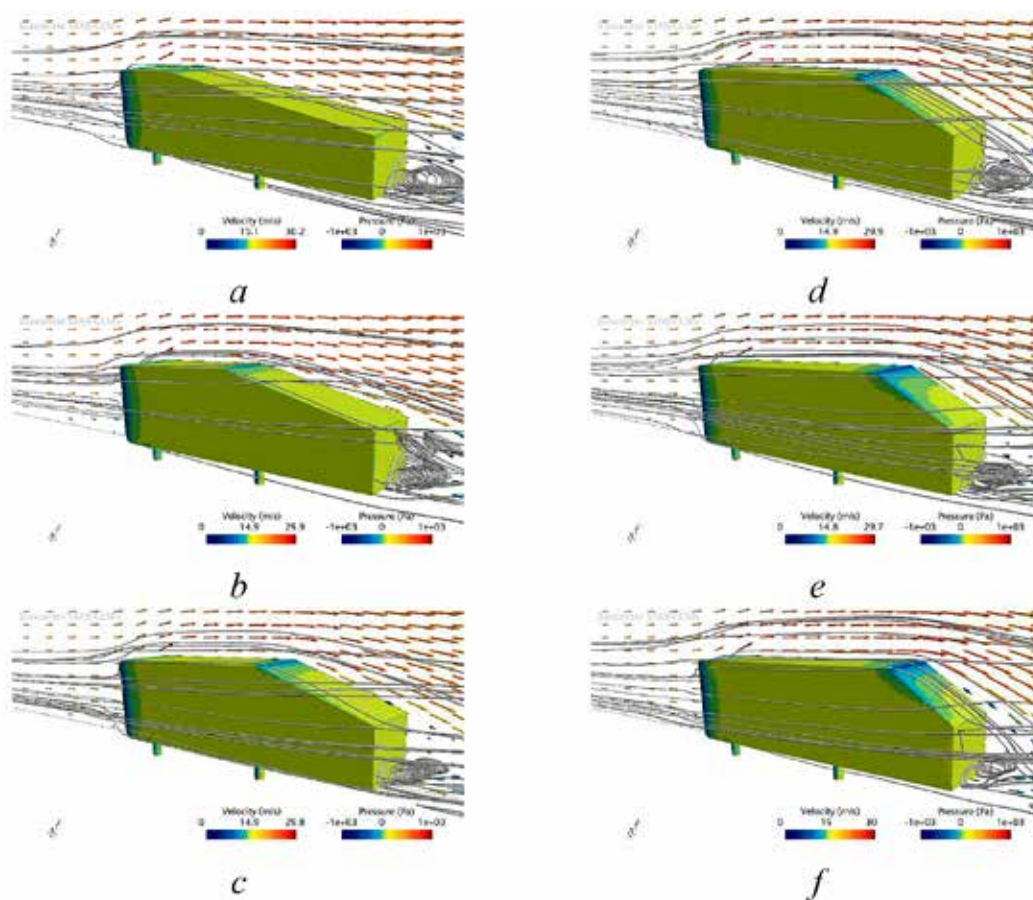


Рис. 1. Типичное поле скоростей и распределение давления, формирующееся при обтекании тела Ахмеда и его модификаций

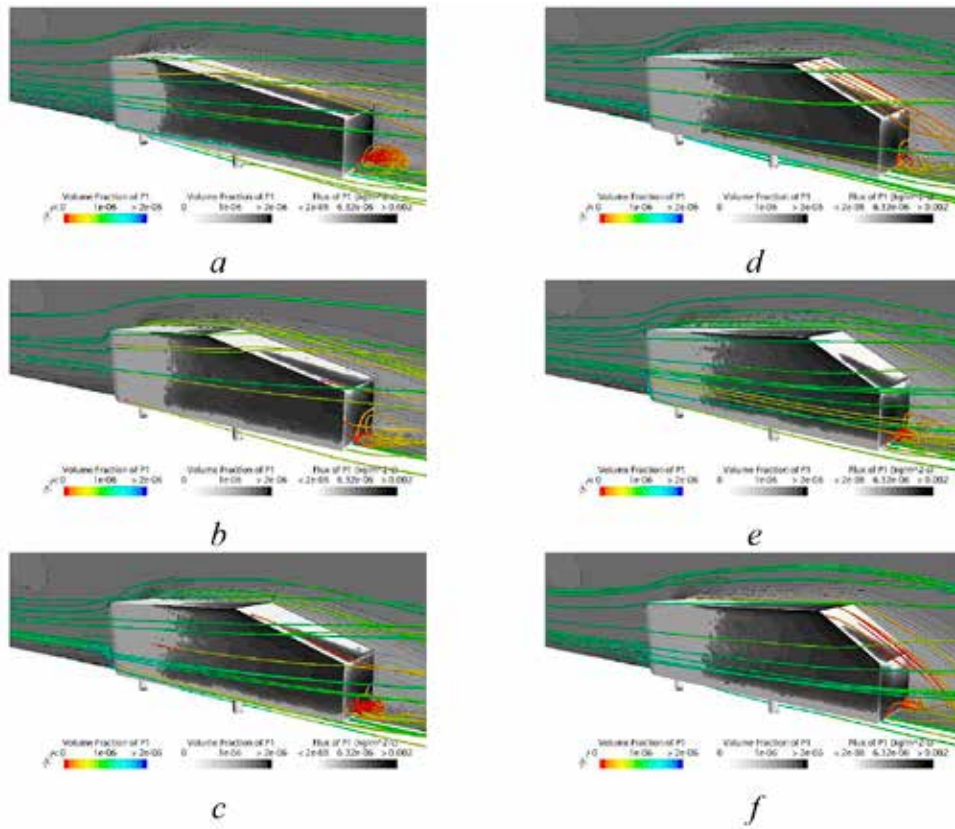


Рис. 2. Моделирование процесса загрязнения тела Ахмеда частицами 1 мкм

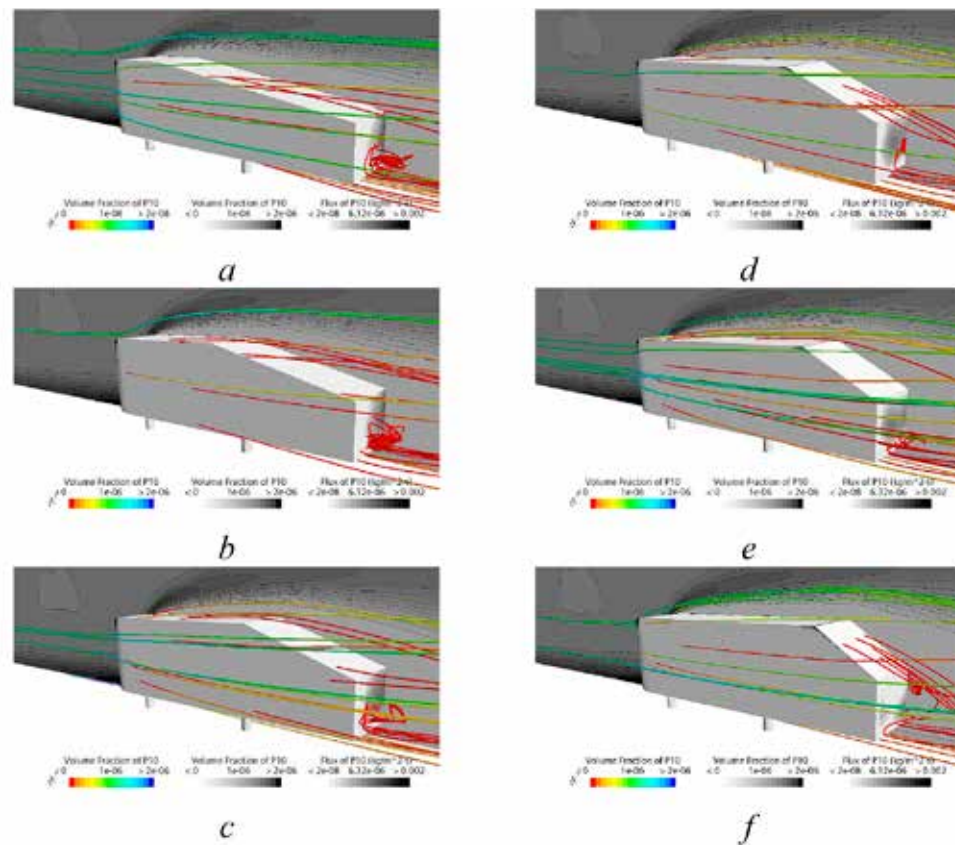


Рис. 3. Моделирование процесса загрязнения тела Ахмеда частицами 10 мкм

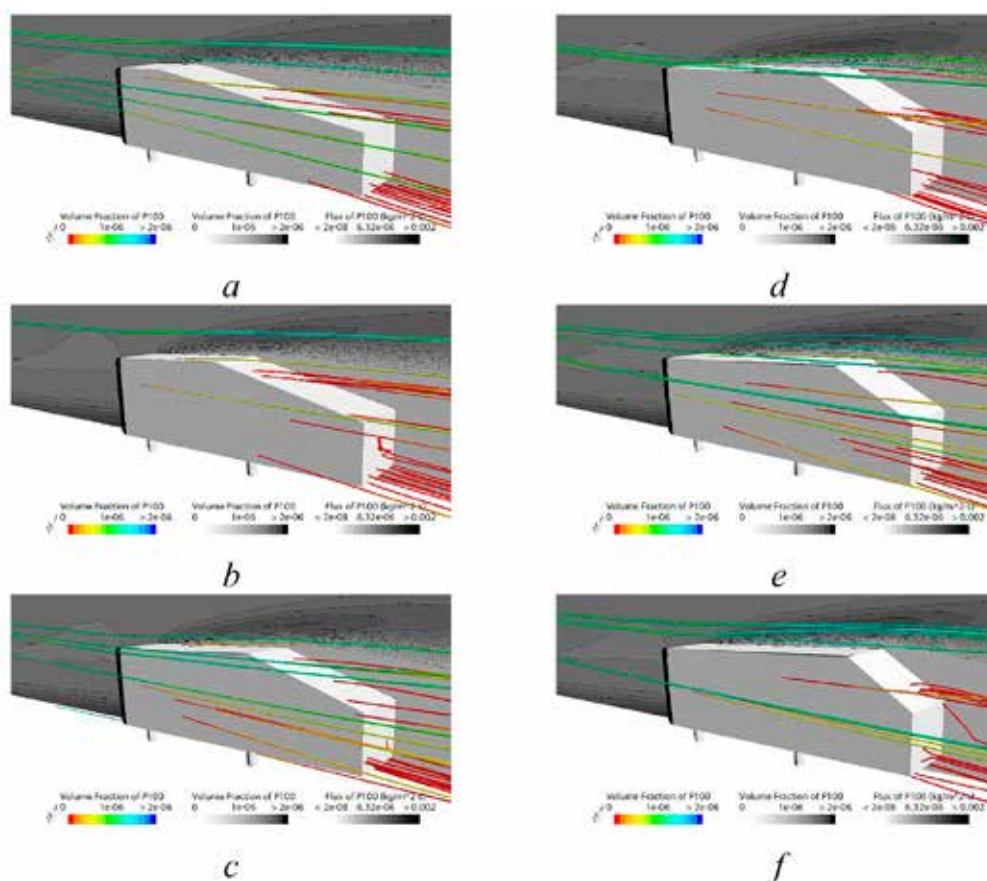


Рис. 4. Моделирование процесса загрязнения тела Ахмеда частицами 100 мкм

Цвет в плоскости симметрии показывает объемную долю частиц. Как показано на рис. 2, частицы размером 1 мкм загрязняют боковые поверхности тела Ахмеда при любом угле наклона кормовой части, но по мере увеличения угла поток загрязняющих частиц уменьшается, а кормовая часть тела Ахмеда и его модификаций загрязняется примерно одинаково. При малом угле наклона (рис. 2, а) площадь загрязнения верхней части кормы больше, что связано с увеличением ее площади.

На рис. 3 видно, что частицы размером 10 мкм почти не загрязняют верхнюю и боковую части тела Ахмеда и его модификаций, но при увеличении угла наклона кормовой части загрязняются ребра, на которых имеет место резкий перепад направления нормали поверхности. Загрязнение задней части поверхности тела Ахмеда уменьшается по мере увеличения угла, что связано с направлением потоков обтекания. При большом угле (рис. 3, f) завихренность меньше, что приводит к тому, что их поток проходит мимо поверхности тела.

На рис. 4 показано загрязнение тела Ахмеда и его модификаций частицами 100 мкм.

Видно, что загрязнения практически не происходит, за исключением ребер на верхней части корпуса, что видно на рис. 4, а–f. Это связано с большой инерцией частиц, препятствующей их попаданию в вихревые потоки.

Заключение

Численное моделирование аэродинамики тела Ахмеда и его модификаций показало, что угол наклона кормовой части тела Ахмеда оказывает существенное влияние на формирование и местоположение вихревой зоны. Мелкодисперсные частицы грязи и пыли, вовлекаемые в вихревые потоки, оседают на поверхности тела. При увеличении коэффициента аэродинамического сопротивления траектории шарообразных частиц приближаются к линиям тока, не пересекающимся с линиями автомобиля, и, следовательно, более крупные частицы, движущиеся под действием силы инерции и аэродинамических сил, приводят к большему налипанию частиц и его загрязнению. При удаленности крупных частиц от автомобиля они быстрее оседают на землю, не достигая его поверхности. Более мелкие

частицы больше вовлекаются в вихревые потоки вблизи поверхности автомобиля, оседая на его поверхности при столкновении. Результаты численного моделирования могут послужить основой для разработки эффективных мер по снижению воздействия загрязнения кормовой части автомобиля и повышению безопасности на дорогах.

Список литературы

1. Howell J., Passmore M., Tuplin S. Aerodynamic Drag Reduction on a Simple Car-Like Shape with Rear Upper Body Taper // *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 2013, Vol. 6, Is. 1. P. 52–60. DOI: 10.4271/2013-01-0462.
2. Collings W., Pao W., Agelin-chaab M. Investigation of the Effectiveness of a Passive Device for Soiling Mitigation for Vehicle Side-Cameras // *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility.* 2020. Vol. 2. P. 3293–3300. DOI: 2020-01-0699.
3. Gaylard A., Pitman J., Jilesen J., Gagliardi A., Duncan B., Wanderer J., Konstantinov A. Insights into Rear Surface Contamination Using Simulation of Road Spray and Aerodynamics // *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 2014. Vol. 7, Is. 2. P. 673–681. DOI: 10.4271/2014-01-0610.
4. Schilling F., Kuthada T., Gaylard A., Wiedemann J., Wagner A. Advances in experimental vehicle soiling tests // *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility.* 2020. Vol. 2. P. 2596–2603. DOI: 2020-01-0681.
5. Zakher B.N., El-Hadary M., Elgohary M.A.E., El Fahham I.M. A Comparison Between Experimental Life Road Simulation and Computational Fluid Dynamics and Fluid Structure Interaction for Sedan // *Car. CFD Letters.* 2022. Vol. 14, Is. 2. P. 81–97.
6. Forbes D.C., Page G., Passmore M., Gaylard A. A fully coupled, 6 degree-of-freedom, aerodynamic and vehicle handling crosswind simulation using the DrivAer model // *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems.* 2016. T. 9. C. 710–722. DOI: 2016-01-1601.
7. Yoshida M., Yamatani A., China H. Prediction of dirt contamination on vehicle body surface // *JSAE Review.* 1998. Vol. 19, Is. 3. P. 257–262. DOI: 10.1016/S0389-4304(98)00015-0.
8. Roettger S., Schulz M., Bartelheimer W., Ertl T. Automotive Soiling Simulation Based On Massive Particle Tracing // *Proceedings of EG/IEEE TCVG Symposium on Visualization VisSym'01.* 2001. P. 309–317.
9. Gaylard A.P., Kabanovs A., Jilesen J., Kirwan K., Lockerby D.A. Simulation of rear surface contamination for a simple bluff body // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 2017. Vol. 165. P. 13–22. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.02.019.
10. Бендерский Б.Я., Чернов К.В. Аэродинамика автомобиля. Курс лекций с краткими биографиями конструкторов и дизайнеров. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2023. 332 с.
11. Котиков Ю.Г. Оценка продольной устойчивости квантомобилиа на базе показателей аэродинамики автомобиля-аналога // *Международный научно-исследовательский журнал.* 2023. № 10 (136). [Электронный ресурс]. URL: <https://research-journal.org/archive/10-136-2023-october/10.23670/IRJ.2023.136.24> (дата обращения: 24.06.2024).
12. Катаева Л.Ю., Ермолаев А.А., Киселева Н.Н., Масленников Д.А. Численное и экспериментальное моделирование обтекания тел различной конфигурации // *Наука и техника транспорта.* 2015. № 1. С. 26–31.
13. Катаева Л.Ю., Масленников Д.А., Анучин И.Е., Тумасов А.В., Катаева Л.Ю., Котова Ю.В. Влияние числа Рейнольдса на аэродинамическое сопротивление моделей // *Современные проблемы науки и образования.* 2013. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11469> (дата обращения: 25.06.2024).
14. Maslennikov D.A., Tumasov A.V., Loshchilova N.A., Kataeva L.Y., Anuchin I.E., Kisleleva N.N. Using discontinuous transformation in numerical simulation of vehicle aerodynamic interaction // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2016. Vol. 11, No. 1. P. 55–66.
14. Катаева Л.Ю., Киселева Н.Н., Масленников Д.А., Романова Н.А. Математическая модель загрязнения легкового автомобиля // *Автомобильная промышленность.* 2015. № 2. С. 3–5.
15. Катаева Л.Ю., Тумасов А.В., Масленников Д.С., Лощилова Н.А., Анучин И.Е., Мошков Д.С. Методология моделирования аэродинамических процессов и загрязнения автомобиля потоками воздуха, содержащими мелкодисперсные частицы грязи // *Журнал автомобильных инженеров.* 2015. № 5 (94). С. 38–45.