

УДК 629.113

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПОТОКАМИ ВОЗДУХА, СОДЕРЖАЩИМИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ ГРЯЗИ

Л. Ю. Катаева, д. ф.-м. н., проф., А. В. Тумасов, к. т. н., доц., Д. С. Масленников, к. ф.-м. н., Н. А. Лощилова, к. ф.-м. н., И. Е. Анучин, асп. / Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
Д. С. Мошков, инж.-констр. III кат. / ООО «Объединённый инженерный центр»

Проблема загрязнения автомобиля при движении во влажную погоду известна уже давно. Загрязнение автомобиля, особенно поверхностей остекления и отражающих поверхностей боковых зеркал, существенно влияет на обзорность, то есть на активную безопасность. Кузов автомобиля загрязняется от нескольких источников: выброса частиц грязи вместе с каплями воды от колеса при движении по влажной дороге и движения автомобиля позади другого автомобиля.

Использование аэродинамической трубы является одним из классических способов исследования потоков воздуха, обтекающих автомобиль. Несмотря на бурное развитие вычислительной техники, численный эксперимент не позволяет в полной мере заменить испытания в аэродинамической трубе. Тем не менее использование традиционной аэродинамической трубы не позволяет проводить исследование специфических процессов.

В 1990 году корпорациями Volvo Car и Volkswagen AG была создана The Climatic Automotive Windtunnel Association (CAWA). Целью ассоциации является взаимодействие между компаниями, использующими климатические аэродинамические трубы. Данное оборудование используется для воспроизведения внешних факторов, влияющих на автомобиль, таких как температура, влажность, осадки, солнечный свет. Это позволяет проводить экс-

перименты независимо от погодных условий и времени года [1].

В большинстве аэродинамических исследований автомобиля предполагается, что транспортное средство является твёрдым телом, которое прикреплено к земле [2]. Но в реальных дорожных условиях автомобили взаимодействуют с ветром, интенсивность и направление которого непостоянны. Эти эффекты могут быть смоделированы на основе стохастического подхода. Несмотря на развитие вычислительной техники, предпочтительно использование реальных аэродинамических труб. Тем не менее экспериментальные установки также обладают недостатками, не присутствующими вычислительным экспериментам, такими как неточное воспроизведение реальных аэродинамических условий, вибрации, а также погрешность измерения. Таким образом, используя модель взаимодействия «жидкость — твёрдое тело», можно исследовать

аэродинамику автомобиля в нестационарной постановке.

В работе [3] отмечено, что развитие численных методов позволило исследовать более сложные эффекты по сравнению с теми, которые могут быть воспроизведены экспериментально. Методы DES (Detached Eddy Simulations), обладающие более высокой точностью как по времени, так и по пространству, позволяют получить более качественное описание нестационарных течений, чем обычный метод осреднения уравнений Навье — Стокса по Рейнольдсу. Более того, ввиду постоянного роста вычислительных мощностей метод DES находит всё большее применение при решении производственных задач.

В программном комплексе Star CCM+ существует несколько способов, позволяющих моделировать загрязнение движущегося автомобиля как в колонне, так и в потоке дисперсных частиц. В данной статье рассмотрены различные

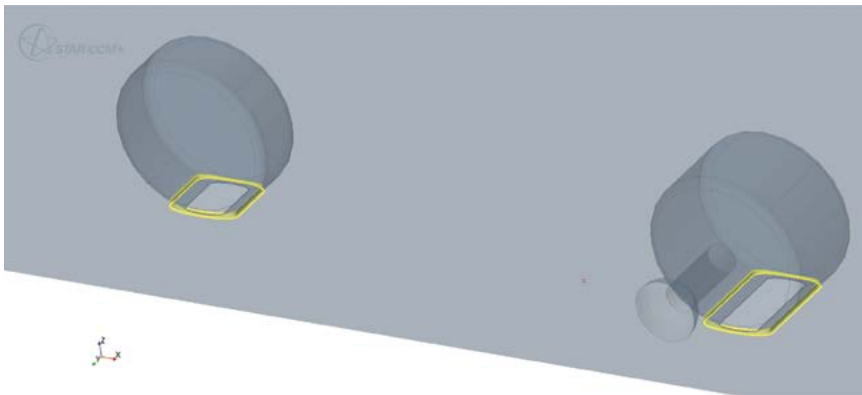


Рисунок 1. Создание сопряжения между колёсами и нижней плоскостью расчётного объёма

способы моделирования источника загрязнения автомобиля: наезд автомобиля на жидкую плёнку и априори заданный поток частиц из-под колеса. Также рассматриваются различные сценарии движения автомобиля: одно транспортное средство и колонна. Во всех задачах система координат связана с автомобилем.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ

Для моделирования динамики потока частиц, формирующегося в результате взаимодействия колеса и мокрой дороги, используется модель жидкой плёнки. Предполагается, что автомобиль движется по дороге и достигает мокрого участка, на котором находится жидкая плёнка. В результате её вза-

имодействия с вращающимися колёсами и отрыва капель от плёнки формируется поток жидких частиц. Для корректного расчёта натекания жидкой плёнки задаётся сопряжение между дорогой и колёсами. Вид колёс с учётом сопряжения (в приведённых расчётах радиус сопряжения составляет 0,015 м) продемонстрирован на рис. 1. Жёлтым цветом выделена область сопряжения.

Размеры расчётной области определяются исходя из малости влияния границ на картину обтекания. При моделировании движения автомобиля в колонне длина расчётной области определяется как сумма длины автомобиля и дистанции между автомобилями в колонне.

Для моделирования всех протекающих процессов необходимо определить расчётную сетку. В дан-

ной симуляции была выбрана многогранная сетка с формированием 20 призматических слоёв вокруг поверхности автомобиля.

Вид объёмной сетки в проекции на автомобиль и плоскость симметрии показан на рис. 2. После построения поверхностной и объёмной сеток были выбраны физические модели. При этом учитывалось, что выполняется решение нестационарной задачи, плотность воздуха предполагалась постоянной, была использована модель турбулентности $k - \omega$. Для моделирования загрязнения были использованы модели жидкой плёнки и лагранжевой многофазности с учётом межфазного взаимодействия.

В модели жидкой плёнки была задана начальная толщина 1 мм при $x < 1,1$ м (ось Ox направлена против движения транспортного средства), а её скорость — 25 м/с

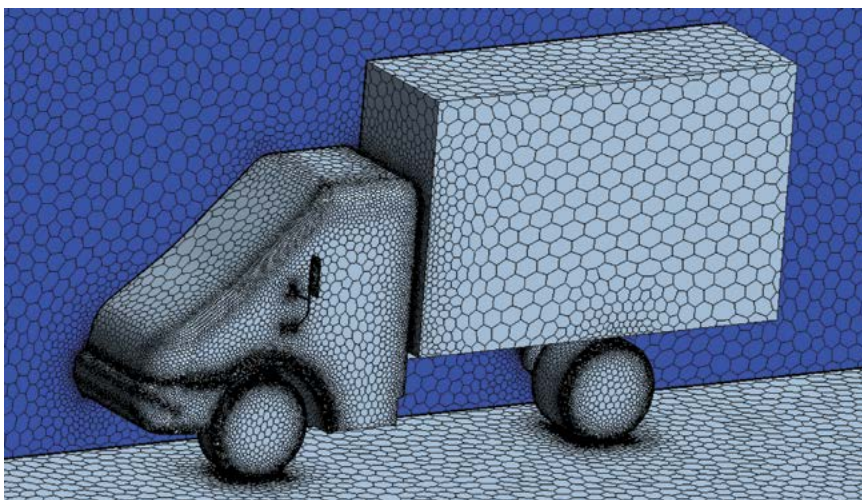


Рисунок 2. Вид объёмной сетки (на поверхности автомобиля и плоскости симметрии)

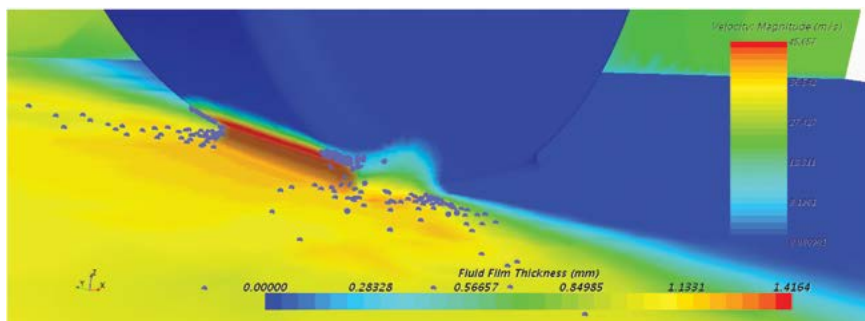


Рисунок 3. Процесс натекания жидкой плёнки на колесо и образования капель

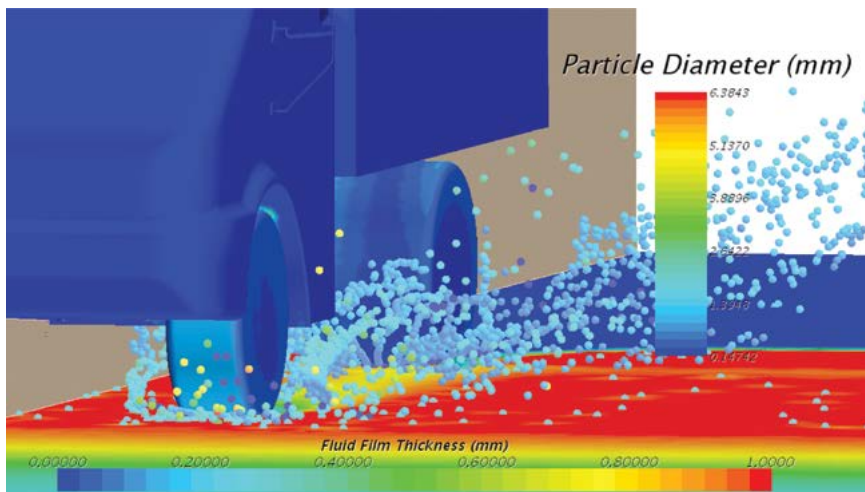
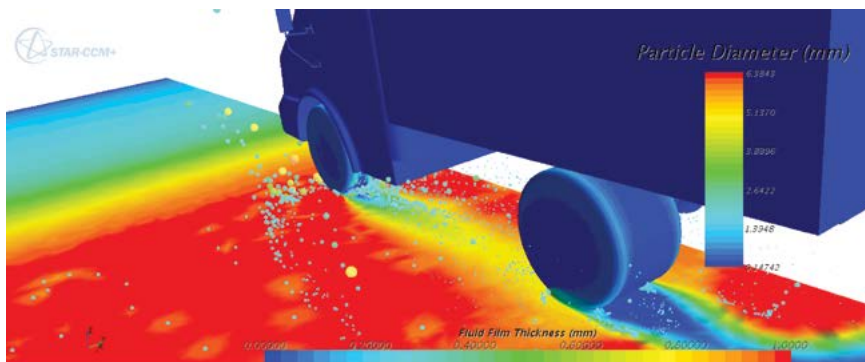


Рисунок 4. Динамика формирования потока капель при движении автомобиля по жидкой плёнке



по координате x . Положение жидкой плёнки определено таким образом, чтобы автомобиль въезжал в неё через небольшой промежуток времени после начала движения. В целях обеспечения устойчивости численной схемы, моделирующей движение жидкой плёнки, было задано ограничение её максимальной толщины в 5 мм. При отсутствии данного ограничения возможно разрушение численной схемы и, как следствие, получение нефизичных результатов. Данное ограничение способствует перерас-

пределению избыточной толщины жидкой плёнки в процессе выполнения итераций. В модели лагранжевой многофазности было учтено формирование частиц при отрыве от жидкой плёнки, их аэродинамическое взаимодействие с воздухом и прилипание к жидкой плёнке.

Все твёрдые границы расчётной области (поверхности дороги и автомобиля) были настроены как оболочка для обеспечения возможности моделирования жидкой плёнки на них. На поверхности дороги было определено поступательное движе-

ние плёнки навстречу автомобилю. Для более реалистичного моделирования потоков вокруг колёс было задано их вращение вокруг своих осей. Кабина и кузов автомобиля считались неподвижными.

Решение выполнялось с шагом по времени $5 \cdot 10^{-4}$ сек. при 50 внутренних итерациях на каждом шаге. На рис. 3 и 4 показаны результаты расчётов, полученные на основе модели жидкой плёнки.

На рис. 3 показано начало процесса наезда переднего колеса автомобиля на жидкую плёнку



Рисунок 5. Эксперимент по определению угла потока частиц из-под колеса

в момент 0,05 сек. Цветовая шкала соответствует толщине плёнки (Fluid Film Thickness) на дороге и поверхности колеса. По рисунку видно, что плёнка поступательно движется на колесо, перетекая на него по часовой стрелке, а колесо вращается против часовой стрелки, сбрасывая с себя плёнку.

На рис. 4 показана конфигурация потока капель и жидкой плёнки в различных ракурсах на момент времени 0,34 сек. На поверхностях автомобиля и дороге показана толщина жидкой плёнки. Частицы воды показаны в виде сфер одинакового размера. Диаметр частиц (Particle Diameter) отображается при помощи цвета согласно шкале.

Можно наблюдать, что частицы не прилипают к внешним поверхностям автомобиля, кроме колёс и подкапотного пространства. На рис. 4а видно, что после отрыва от колеса капли летят вверх под небольшим углом к горизонту, что может способствовать загрязнению транспортных средств, движущихся позади. В то же время сам движущийся автомобиль не загрязняется. Также следует отметить динамику изменения толщины плёнки при наезде на неё колёсами. Позади переднего колеса на дороге остаётся след с уменьшенным слоем жидкой плёнки, которая постепенно увеличивает свою толщину при приближении к заднему колесу. Вследствие этого заднее колесо наезжает

на плёнку толщиной около 0,7 мм, и область пониженной толщины жидкой плёнки существенно больше позади него.

В данном расчёте на основе модели жидкой плёнки относительно реалистично воспроизводятся распределение жидкости по боковой поверхности колеса и её отрыв в виде капель. Тем не менее с ростом толщины плёнки увеличивается её скорость перемещения, как следствие, требования к шагу по времени становятся более жёсткими. Учитывая то, что шаг по времени жёстко фиксирован для всех моделируемых процессов, существенно увеличивается время, требуемое для выполнения расчётов, но даже это не снимает необходимости вводить ограничение на толщину жидкой плёнки. Следует отметить, что ширина зоны с максимальной толщиной плёнки мала, что позволяет перераспределить избыточную толщину по поверхности плёнки во время проведения внутренних итераций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ, ДВИЖУЩЕГОСЯ В КОЛОННЕ, НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИНЖЕКТОРА

Для построения симуляции на основе модели инжектора используется алгоритм, во многом схожий с описанным ранее. К наиболее существенным отличиям следует

отнести отсутствие необходимости использования модели жидкой плёнки и связанных с ней межфазных взаимодействий. Лагранжева фаза вносится в модель при помощи инжектора, расположенного непосредственно за колесом. Такой способ позволяет задать поток частиц априорно. В данной симуляции используется объект Star CCM+ «сплошной конический инжектор». Для определения его параметров в НГТУ им. Р. Е. Алексеева был проведён эксперимент по определению угла потока частиц из-под колеса. Фрагмент эксперимента представлен на рис. 5. В рамках эксперимента исследовалась динамика потока частиц воды из-под вращающегося колеса с заданной скоростью в пределах от 10 до 60 км/ч. Вода была подкрашена для визуализации потока частиц, выходящих из-под колеса.

По полученным экспериментальным данным было выявлено, что внешний угол конуса инжектора составляет 1,7 радиана, направление оси инжектора соответствует углу 0,425 радиана. В расчёте на каждый шаг по времени производился выброс 5 облаков (Parcels) частиц (Particles) из инжектора. Диаметр частицы был равен 100 мкм, что соответствует размеру мелких капель воды. Массовый расход равномерно распределялся на весь инжектор и составлял 4 кг/с. Мас-

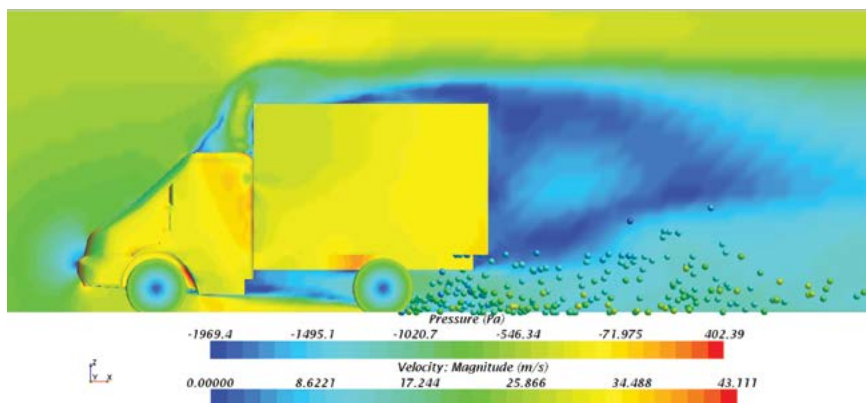


Рисунок 6. Формирование потока частиц из-под колеса ($t = 0,397$ сек.)

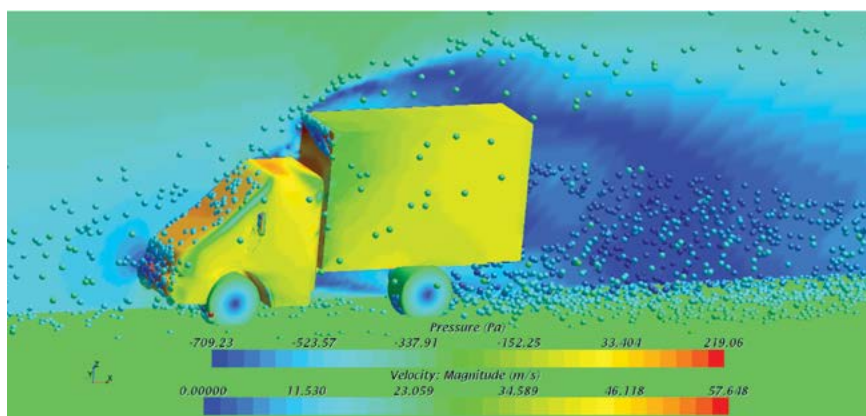


Рисунок 7. Динамика движения и оседания частиц воды на автомобиль ($t = 5,5$ сек.)

совый расход определялся на основе следующей формулы:

$$V = u \cdot d \cdot l \cdot k_s \cdot \rho, \quad (1)$$

где V — массовый расход частиц, кг/с; u — скорость автомобиля, м/с; l — толщина плёнки воды на дороге, мм; d — ширина колеса, м; k_s — коэффициент прилипания воды к колесу; ρ — плотность воды, кг/м³.

Использование инжектора для формирования лагранжевой фазы позволяет моделировать движение дискретных частиц. Тем не менее частицы (Particles) группируются в облака (Parcels), число которых определяется настройками модели. Множество частиц, составляющих облако, является неделимым. В выполненных расчётах в каждом облаке (Parcel) находится порядка 107 частиц. Это снижает точность моделирования аэродинамики взаимодействия лагранжевой и газовой фаз и распределения потока частиц по поверхности автомобиля. Частицы можно наблюдать толь-

ко на поверхностях, на которые они попадают с высокой вероятностью. В результате этого на поверхностях, имеющих малую площадь, таких как боковое зеркало, анализ загрязнения затруднителен.

Результаты расчётов, полученных на основе данной симуляции, приведены на рис. 6 и 7. На поверхности автомобиля, кроме колёс, цветовая гамма соответствует давлению (Pressure). На дороге, частицах воды и плоскости симметрии (находящейся на заднем плане) цветовая гамма определяет модуль скорости (Velocity: Magnitude).

Результаты моделирования при движении транспортного средства в колонне на момент 0,397 сек. от начала работы инжектора, то есть въезда транспортного средства на мокрый участок дороги, приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что из-под заднего колеса вылетают частицы, которые затем прилипают к дороге и к поверхности авто-

мобиля. На данном этапе частицы находятся преимущественно на небольшой высоте. Частицы, инжектированные под большим углом к горизонту, прилипают к нижней части кузова. По мере развития процесса угол разлёта частиц уменьшается, а их движение становится более зависимым от поля скоростей газовой фазы, а не начальных условий. Тем не менее начальная скорость и положение частиц сказываются на их положении в потоке. На дальнейшее движение частиц также влияет сила тяжести, в результате чего по мере удаления от заднего бампера автомобиля большая доля частиц оседает на дороге.

С течением времени формируется поток частиц, который, проходя через циклическую границу, достигает поверхности следующего автомобиля в колонне, оседая на нём. Динамика данного процесса на момент времени 5,5 сек. показана на рис. 7. На нём наглядно

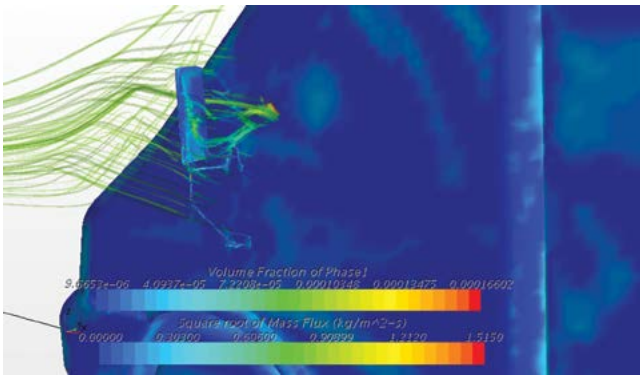


Рисунок 8. Распределение потока дисперсных частиц размером 1 мкм по поверхности автомобиля и траектории их движения вокруг бокового зеркала модели 1

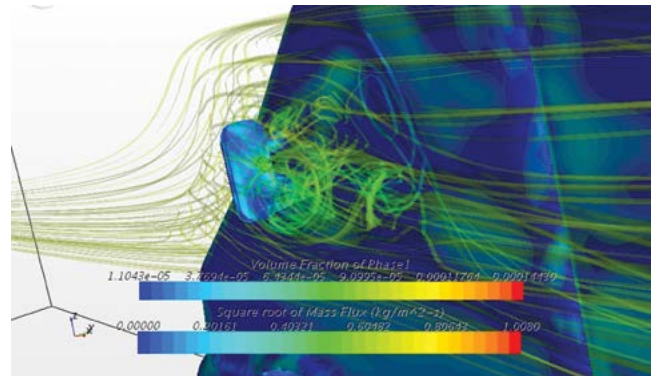


Рисунок 11. Распределение потока дисперсных частиц размером 1 мкм по поверхности автомобиля и траектории их движения вокруг бокового зеркала модели 2

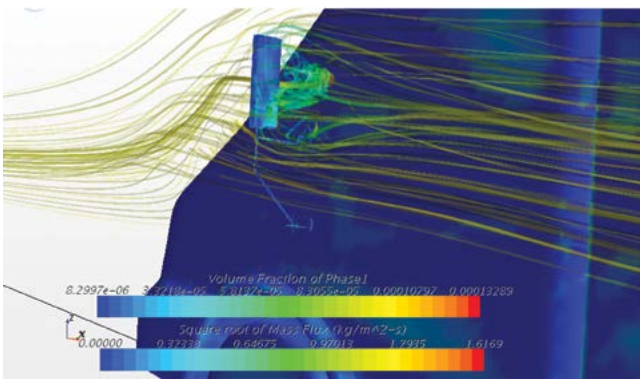


Рисунок 9. Распределение потока дисперсных частиц размером 10 мкм по поверхности автомобиля и траектории их движения вокруг бокового зеркала модели 1

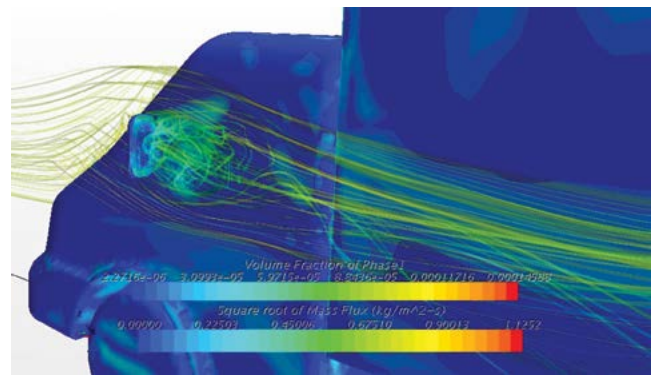


Рисунок 12. Распределение потока дисперсных частиц размером 10 мкм по поверхности автомобиля и траектории их движения вокруг бокового зеркала модели 2

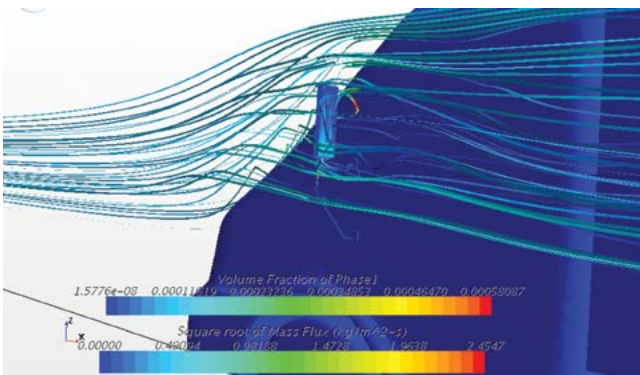


Рисунок 10. Распределение потока дисперсных частиц размером 100 мкм по поверхности автомобиля и траектории их движения вокруг бокового зеркала модели 1

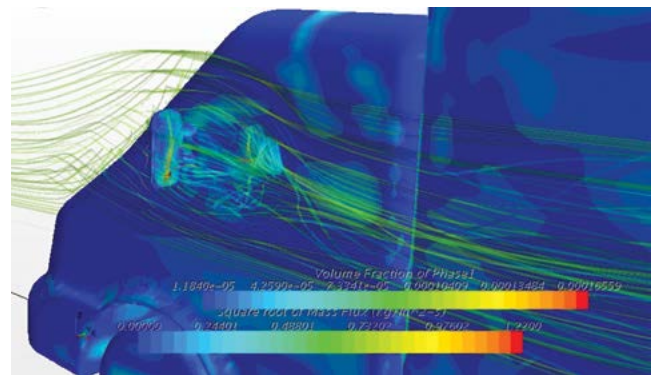


Рисунок 13. Распределение потока дисперсных частиц размером 100 мкм по поверхности автомобиля и траектории их движения вокруг бокового зеркала модели 2

продемонстрировано, что частицы подхватываются потоком воздуха над автомобилем и долетают до следующего транспортного средства в колонне и их количество достаточно велико.

При моделировании загрязнения одного автомобиля, движущегося на большом удалении от других транспортных средств и находящегося вне их влияния, отсутствует поток частиц, проходящих через циклическую границу. В то же время частицы, вылетающие из-под колеса, имеют слишком большую начальную скорость, не позволяющую им прилипнуть к какой-либо поверхности автомобиля, кроме нижней части кузова.

Проведённые расчёты показали, что при движении в колонне в наибольшей степени загрязняются передний бампер, лобовое стекло, верхняя передняя часть кузова и тыловая часть бокового зеркала. Определение менее загрязняемых частей поверхности представляет серьёзную сложность при использовании модели лагранжевой многофазности. Для их выявления следует существенно увеличить число потоков частиц грязи при моделировании, что потребовало бы большего объёма вычислений и, как следствие, более мощной вычислительной техники.

РАСЧЁТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

Моделирование аэродинамики на основе лагранжевых частиц и метода жидкой плёнки сопряжено с большими вычислительными затратами. Возможным способом решения данной проблемы является отказ от моделирования дискретных частиц и их групп с заменой на дисперсную фазу, характеризующуюся эффективным размером частиц, плотностью, аэродинамическими характеристиками и объёмной долей в пространстве. Такой

подход позволяет получить распределение массового потока частиц на поверхности автомобиля с учётом разрешающей способности расчётной сетки. Хотя этот метод не снимает полностью проблему погрешности, связанной с заменой частиц осреднёнными характеристиками, при моделировании мелкодисперсной фазы такой подход приводит к меньшей погрешности, чем использование лагранжевых частиц.

Данный подход позволяет использовать стационарную постановку для определения динамики загрязнения, что, однако, несовместимо с моделью жидкой плёнки. Недостатком такого приёма является невозможность учёта перемещения частиц по поверхности автомобиля.

При моделировании загрязнения автомобиля с помощью данного подхода необходимо заменить модель лагранжевой многофазности моделью дисперсной многофазности. В качестве дисперсной фазы выбирается вода с заданными размером частиц и плотностью. Аэродинамическое взаимодействие дисперсной и газовой фаз определяется по модели Schiller — Naumann. В качестве источника частиц задаётся входная граница (Inlet). На ней определяются объёмная доля частиц 10^{-4} и скорость, соответствующая скорости газовой фазы. На поверхности автомобиля и дороги для дисперсной фазы определяется условие вылета частиц, что, с одной стороны, даёт возможность учёта массового потока частиц через поверхность, а с другой — обеспечивает поглощение частиц твёрдыми поверхностями.

В данной серии расчётов исследуется влияние величины размера частиц на их распределение по поверхности автомобиля. На рис. 8–10 приведены результаты моделирования при размерах частиц дисперсной фазы 1, 10 и 100 мкм и модели зеркала 1. Для наглядной

визуализации загрязнения автомобиля цветовая гамма на поверхности автомобиля соответствует квадратному корню интенсивности попадания частиц на поверхность (Square Root of Mass Flux). Линии тока построены на основе векторного поля скоростей дисперсной фазы. Цвет линий соответствует объёмной доле дисперсной фазы (Volume Fraction of Phase 1).

Как видно из результатов, при диаметре частиц 1–10 мкм в картине загрязнения много общего. Наиболее загрязняемыми поверхностями являются передний бампер, передняя стойка кабины, передняя часть кузова и тыльная сторона зеркала заднего вида. С лицевой стороны зеркала имеет место вихрь, конфигурация которого зависит от размеров частиц.

Характер загрязнения автомобиля более крупными частицами (диаметром 100 мкм) существенно отличается от картины, формирующейся при частицах размера 1–10 мкм. Движение таких частиц в большей степени обусловлено гравитацией и инерцией. В связи с этим в большей степени загрязняются передние выступающие части поверхности автомобиля, тогда как большая часть поверхности остаётся чистой. Несмотря на это, боковое стекло и зеркало загрязняются. При этом около зеркала формируется область повышенной объёмной доли мелкодисперсных частиц.

На рис. 11–13 показаны результаты моделирования загрязнения автомобиля с моделью зеркала 2, которое отличается от модели 1 формой и способом крепления к кабине.

Как видно из результатов расчётов, изменение формы зеркала влияет не только на аэродинамику тела, но и на картину загрязнения всего автомобиля. На рис. 9 и 11 можно видеть существенное изменение картины вихревых течений около зеркала. Это, в свою очередь,

влияет на течение газовой и дисперсной фаз вблизи поверхности автомобиля. В случае большего диаметра частиц (10 и 100 мкм) вихри около лицевой стороны зеркала выражены более явно при движении автомобиля с боковым зеркалом модели 2. Для случая частиц диаметром 100 мкм имеет место их прилипание к тыльной стороне зеркала без формирования вихря около бокового стекла, что обеспечивает чистоту бокового зеркала и большей части кузова.

Согласно результатам расчётов, ни в одном случае не происходит загрязнения всей поверхности. Это связано с поведением мелкодисперсных частиц. Согласно математической модели, поверхность автомобиля непроницаема для газовой фазы. Частицы, движущиеся в воз-

душном потоке, могут отклоняться от него вследствие силы тяжести и изменения скорости и направления движения потока. В случае когда поток воздуха обтекает твёрдое тело, частицы продолжают двигаться по инерции, долетая до твёрдого тела, несмотря на аэродинамическую силу, действующую на них.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12 февраля 2013 года (Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

Экспериментальные исследования выполнены с использованием измерительного оборудования центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ассоциация автомобильных климатических аэродинамических труб CAWA: сайт организации. — 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cawa-online.org/index.php/history> (дата обращения: 05.12.2014).
2. Hugo G. Castro Computational Study of Unsteady Road Vehicle Aerodynamics Including Fluid-Structure Interaction / Hugo G. Castro, Rodrigo R. Paz, Mario A. Storti, Victorio E. Sonzogni // *Mecanica Computacional*. — 2013. — Vol. XXXII. — P. 1 409–1 425.
3. Numerical Investigation of Unsteady Crosswind Aerodynamics for Ground Vehicles [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:273411/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 05.12.2014).