



КОМПЬЮТЕРНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.01.02

В.С. КАРАБЦЕВ, канд. техн. наук, доц.

руководитель службы конструкторских и научно-исследовательских расчетов¹

доцент кафедры информационных систем²

E-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация

²Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация

Поступила в редакцию 15.01.2026.

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Процесс проектирования, производства и эксплуатации изделий автомобильной промышленности в современных условиях немислим без внедрения компьютерных технологий на всех этапах жизненного цикла. Одной из ключевых задач при этом является подтверждение соответствия разрабатываемого продукта предъявляемым к нему требованиям с использованием валидированных расчетных моделей на самых ранних стадиях проектирования. В статье на нескольких примерах показан опыт применения расчетных исследований аэродинамических характеристик транспортных средств и их компонентов. Выполнено сравнение полученных результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными. Разработаны рекомендации по повышению точности расчетов по оценке расхода топлива.

Ключевые слова: колесное транспортное средство, КТС, скорость потока, коэффициент аэродинамического сопротивления, распределение давления, валидация

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-2-75-24-33>

Введение. Среди множества методов исследований аэродинамических характеристик в последние годы все большее распространение получают численные методы моделирования с использованием высокопроизводительных компьютеров и специализированного программного обеспечения. Усилия специалистов при этом направлены на создание на ранних стадиях проектирования таких форм кабин и кузовов транспортных средств, которые обеспечивают выполнение различных потребительских запросов по топливной экономичности, управляемости и устойчивости, микроклимату в кабине.

Анализ опубликованных работ специалистов и ученых России и Беларуси [1–5], зарубежных авторов [6–9] по расчетным методам определе-

ния аэродинамических характеристик колесных транспортных средств (КТС) показывает, что эти методы постоянно развиваются и совершенствуются. Причем развиваются они и в других сферах машиностроения: авиа- и двигателестроении, железнодорожном транспорте, о чем свидетельствуют публикации [10–13].

В работе [14] представлен обзор методов дорожных испытаний по оценке аэродинамических характеристик и, прежде всего, аэродинамического сопротивления. Основным преимуществом методов дорожных испытаний является возможность получения экспериментальных данных на натурном образце КТС при движении его в условиях естественного воздействия безграничного турбулентного набегающего потока воздуха в при-

земном слое атмосферы. Вместе с тем при применении на практике этих методов не избежать трудностей, связанных с определением силы аэродинамического сопротивления отдельно от других составляющих: потерь в трансмиссии и сопротивления качению шин. И если потери в трансмиссии можно определить отдельно на специальных стендах, то в отношении двух других составляющих это сделать гораздо сложнее.

Также показано, что значительный объем экспериментальных исследований выполнен с использованием масштабных моделей в аэродинамических трубах. Несмотря на достаточно широкую популярность данного метода, он тоже не лишен существенных недостатков. Ограниченность потока в аэродинамической трубе со стороны ее стенок, неполное геометрическое подобие модели и натурного образца и не всегда адекватная имитация дорожного полотна и внутренних потоков, а также отсутствие вращения колес и других деталей автомобиля (вентилятора, карданных валов и т. д.) неизбежно приводят к ошибкам при измерении коэффициента аэродинамического сопротивления. Аэродинамических труб, предназначенных для испытаний грузовых КТС с полуприцепом в натуральную величину, движущихся на беговых барабанах или по бегущей ленте, в мире еще не построено.

Расчетные методы привлекают исследователей своей малой стоимостью по сравнению с натурными испытаниями и высокой производительностью. Они применяются при оценке влияния отдельных факторов, таких как радиус кривизны поверхности, угол наклона ветрового стекла на распределение скоростей потока и давления по поверхности КТС и другие параметры. Численные методы позволяют получить приемлемую точность, сопоставимую с точностью при исследованиях в аэродинамических трубах в оценке коэффициента аэродинамического сопротивления КТС и других параметров.

Требования к компьютерным моделям, терминология и другие аспекты численного моделирования отражены в ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», ГОСТ Р 57412-2017 «Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения», ГОСТ Р 57188-2016 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения», ГОСТ Р 57700.14-2018 «Численное моделирование физических процессов. Верификация получаемых сеточными методами численных решений задач механики сплошной среды» и некоторых других.

В соответствии с ГОСТ Р 57700.14-2018 должна быть сформулирована постановка задачи, которая включает в себя описание области моделирования, замкнутую систему уравнений, начальные

и граничные условия. Постановка задачи формулируется в соответствии с физикой моделируемого процесса или явления. Граничные условия задаются величинами из допустимого диапазона значений. При серии однотипных расчетов в одинаковой постановке, но с различными входными параметрами (серийные расчеты) выполнять исследование сходимости решения для всех расчетов не обязательно, достаточно ограничиться одной из задач серии.

Интенсивное внедрение различных коммерческих продуктов для выполнения расчетных задач механики жидкости и газа (ANSYS CFD, STAR-CCM+, а позднее и отечественного программного продукта LOGOS) в различных отраслях машиностроения началось в конце прошлого века, т. е. задолго до появления перечисленных ГОСТ. Несмотря на отсутствие нормативной базы, за этот период на ПАО «КАМАЗ» накоплен определенный опыт выполнения расчетных исследований аэродинамических характеристик различных КТС (автомобилей, автопоездов, автобусов, электробусов) и их компонентов, поэтому из-за многообразия решаемых задач вопросы методического характера в статье освещены не в полной мере.

Цель работы — показать возможность выполнения требований с помощью расчетных исследований на этапах проектирования и доводки КТС и их компонентов и подчеркнуть необходимость и важность валидации расчетных моделей по результатам испытаний физических объектов. Для примера изложим процесс выполнения расчетных исследований с использованием коммерческого продукта STAR-CCM+.

Процесс выполнения расчетных исследований в STAR-CCM+. Для расчета используется полная геометрическая модель автопоезда без каких-либо упрощений в масштабе 1:1. Целью расчета является определение следующих аэродинамических характеристик: коэффициенты составляющих сил C_x , C_y , C_z , и моментов m_x , m_y , m_z ; степень турбулентности потоков воздуха и расположение зон вихреобразования у поверхности автомобиля; изолинии коэффициента давления C_p на поверхностях исследуемой конструкции автопоезда; поле скоростей и линии тока на боковых и верхних поверхностях кабины и фургона. Для расчета безразмерных аэродинамических характеристик используются следующие формулы:

$$C_x = \frac{F_x}{qS}; \quad C_y = \frac{F_y}{qS}; \quad C_z = \frac{F_z}{qS},$$

где C_x , C_y , C_z — коэффициенты лобового сопротивления, боковой силы и подъемной силы соответственно; F_x , F_y , F_z — компоненты силы, действующей на автомобиль, в направлении осей x , y и z соответственно; $q = \frac{\rho v^2}{2}$ — скоростной напор (ρ — плотность невозмущенного потока воздуха,

кг/м³; v — скорость невозмущенного потока воздуха, м/с);

$$m_x = \frac{M_x}{qSL}; \quad m_y = \frac{M_y}{qSL}; \quad m_z = \frac{M_z}{qSL},$$

где m_x , m_y , m_z — коэффициенты момента относительно осей x , y и z соответственно; M_x , M_y , M_z — моменты сил относительно центра масс, действующие относительно осей x , y и z соответственно, Н·м; L — характерная длина автомобиля.

Несмотря на то, что при проведении исследований рассчитываются все перечисленные выше величины, ввиду ограничений по объему статьи информация будет представлена только в отношении коэффициента C_x , сил F_x , F_y и распределений скоростей, давлений. При оценке параметров микроклимата рассчитывается и температура воздуха контрольных точек кабины.

Коэффициент давления определяется по формуле:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q},$$

где p — абсолютное давление в заданной точке течения, Па; p_∞ — абсолютное давление невозмущенного потока воздуха, Па.

Для расчета аэродинамических показателей характерная площадь (мидель) S составляет 9,96 м². Из-за отсутствия экспериментальной величины коэффициента пористости K (кг/м³·с) радиатора системы охлаждения двигателя грузовика в расчетной модели используются коэффициенты гидравлического сопротивления пористости радиатора легкового автомобиля. Коэффициент пористости радиатора рассчитан по формуле

$$K = \alpha \cdot v + \beta,$$

где α , β — коэффициенты гидравлического сопротивления пористости, определяемые геометрией радиатора и равные 90 кг/м⁴ и 375 кг/м³·с соответственно.

В процессе исследований используется модель турбулентности k - ϵ , которая является основной при проведении расчетов аэродинамических характеристик в автомобильной промышленности.

3D-модель автопоезда располагается в расчетной области компьютерной модели (КМ), представляющей собой параллелепипед, который имитирует окружающее КТС пространство. Движение автопоезда имитируется натекающим на модель потоком воздуха со скоростью v . Фронтальная грань параллелепипеда является входной границей потока, противоположная ей грань — выходной границей, на которой задано атмосферное давление $P = P_{\text{атм}}$ (рисунок 1). Размеры границ расчетной области указаны ниже.

Для построения поверхностной сетки каждой детали, в зависимости от ее размера и расположения, назначался определенный размер поверхност-

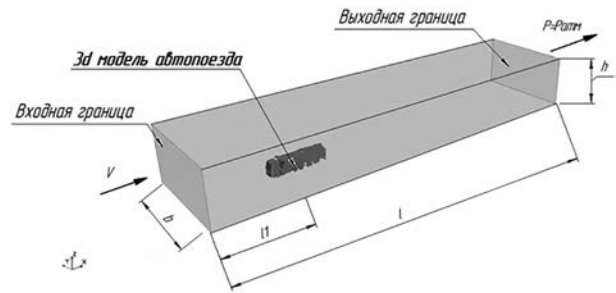


Рисунок 1 — КМ для расчета аэродинамических характеристик
Figure 1 — Computer model for calculating aerodynamic characteristics

ной ячейки, определялась плавность закруглений. Таким образом, удалось создать детальную сетку, учитывающую все особенности геометрии. В областях, открытых воздушному потоку, сетка была соответственно измельчена, в закрытых областях использовалась более крупная ячейка. Данная методика позволила избежать излишне большой размерности поверхностной сетки без ущерба для точности анализа. На поверхности кабины автомобиля наносится расчетная сетка с размерами ячейки от 5 до 20 мм, на поверхности полуприцепа — от 5 до 40 мм, на поверхности двигателя, коробки передач и прочих элементов моторного отсека — от 5 до 10 мм.

Часть компьютерной модели, имитирующая пространство вокруг автомобиля, согласно рисунку 1 имеет следующие геометрические размеры: $b = 22,5$ м; $h = 12$ м; $l = 90$ м; $l_1 = 16$ м. На ее поверхности нанесена сетка с размерами ячейки 150 мм. После построения сетки на поверхности модели производится построение объемной сетки с размерами элементов от 5 до 150 мм.

Для расчета внешнего обтекания была построена сетка, состоящая преимущественно из гексагональных ячеек с небольшим количеством многогранных ячеек. Основываясь на поверхностной сетке, объемная сетка имеет установленные ранее размеры ячейки вблизи поверхности и такую же подробную детализацию. Размер ячейки на удалении от поверхности регулируется заданной в сеточном генераторе скоростью роста сетки. Размер ячейки последовательно увеличивается от ее размера на поверхности к максимальному заданному в модели. Для стабилизации расчета в пространстве около автомобиля выделена отдельная прямоугольная сеточная область, в которой установлен свой максимальный размер ячеек. Расчеты выполнялись как с вращающимися, так и с неподвижными колесами. Результаты расчетов с вращающимися колесами в данной работе не представлены.

Результаты расчетных исследований. Распределение давления на поверхностях кабины автомобиля и полуприцепа при скорости движения 90 км/ч приведено на рисунке 2. Из анализа данных следует, что фронтальная панель кабины



Рисунок 2 — Распределение давления
Figure 2 — Pressure distribution

находится в зоне избыточного давления, достигающего величины 410 Па. На передних боковых и вертикальной верхней кромках кабины находятся области пониженного давления, что свидетельствует о наличии отрыва потока.

Помимо внешнего обтекания, большое внимание уделяется характеру распределения воздушных потоков в подкапотном пространстве, т. к. эти потоки определяют тепловой режим двигателя и его системы охлаждения. Для этого в области решетки радиатора формируется мелкая расчетная сетка, учитываются все детали подкапотного пространства и параметры внешней аэродинамики автомобиля.

Поле скоростей в продольном сечении модели при скорости движения 90 км/ч для примера отражено на рисунке 3. Из данных рисунка следует, что поток воздуха, отрывающийся с верхней кромки обтекателя на крыше кабины, направляется выше передней верхней кромки полуприцепа. Желательно же его направлять строго на переднюю верхнюю кромку полуприцепа. На крыше кабины скорость потока превышает 30 м/с, что приводит к понижению давления над крышами кабины и полуприцепа. Эта область разрежения

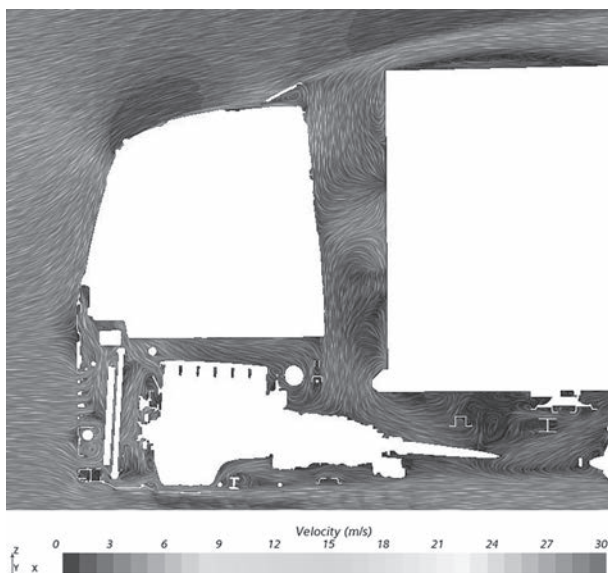


Рисунок 3 — Распределение скоростей
Figure 3 — Speed distribution

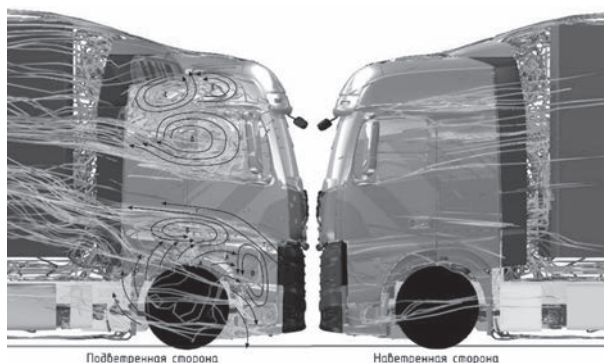


Рисунок 4 — Линии тока на подветренной и наветренной стороне
Figure 4 — Downwind and windward current lines

способна инициировать восходящий вдоль дверей кабины поток воздуха, переносящий мелкие твердые и жидкие частицы на боковые стекла, зеркала заднего вида и в систему очистки воздуха.

Структура линий тока на наветренной и подветренной сторонах кабины автопоезда, показанная на рисунке 4, свидетельствует о существенной разнице в характере обтекания боковых поверхностей при наличии бокового ветра.

На наветренной стороне зоны завихрений потока существенно меньше, чем на подветренной. В последнем случае образуются зоны завихрений и в верхней части кабины, в особенности за зеркалом заднего вида, и в нижней части кабины — над колесной аркой и в области ступенек. Таким образом еще раз подтверждается формирование восходящего от арок передних колес потока воздуха, который увлекает за собой мелкие частицы пыли и грязи вдоль дверей кабины вверх.

Аналогичные результаты расчетных исследований были получены и многими другими авторами, поэтому перейдем к результатам исследований, представляющим не меньший интерес, но отраженным в литературе не так широко.

Начнем с анализа динамических нагрузок, действующих на два автопоезда, движущихся навстречу друг другу со скоростью 90 км/ч. КМ и схема движения автопоездов показаны на рисунке 5. Расстояние между автопоездами в боковом направлении составляет 3 м.

Расчеты выполнялись как при наличии бокового ветра, так и при его отсутствии. Получаемые

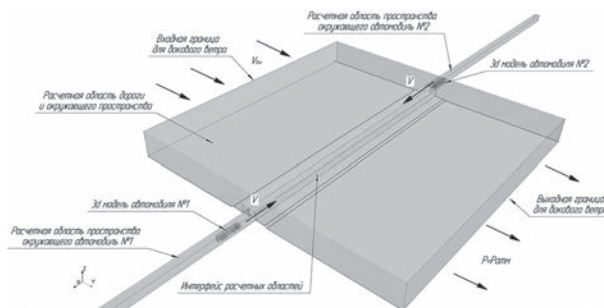


Рисунок 5 — КМ и схема движения автопоездов
Figure 5 — Computer model and traffic patterns of road trains

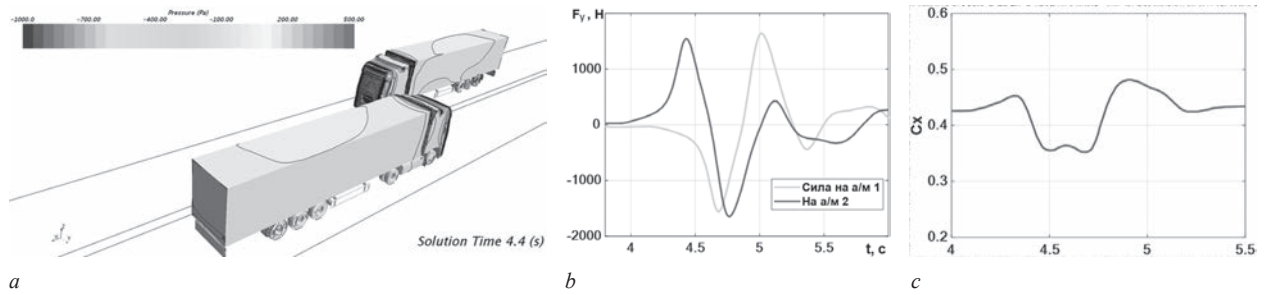


Рисунок 6 — Распределение давления (а), боковые силы (b) и коэффициент C_x (c)
 Figure 6 — Pressure distribution (a), lateral forces (b) and coefficient C_x (c)

в различные моменты времени распределения давления (рисунок 6 а) в момент времени 4,4 с по поверхностям идентичных транспортных средств путем интегрирования позволили рассчитать суммарную боковую силу (в Ньютонах) F_y (см. рисунок 6 б), приведенную к центрам тяжести и действующую на каждый автопоезд. На рисунке 6 с отражено изменение коэффициента аэродинамического сопротивления одного из автопоездов во времени при отсутствии бокового ветра.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что боковая сила и коэффициент C_x являются нестационарными величинами: амплитуда колебаний боковой силы, действующей на автопоезд, достигает 1500 Н, а C_x при этом изменятся от 0,35 до 0,48 в указанном временном интервале. Колебания боковой силы при каждом подобном маневре будут вызывать боковую раскачку КТС, которая приведет к перераспределению боковых реакций и последующему изменению траектории движения, которую придется корректировать поворотом рулевого колеса.

Каждый поворот управляемых колес относительно положения, соответствующего направлению прямолинейного движения, приводит к возрастанию сопротивления качению шин и расхода топлива. Оценим его следующим образом.

Коэффициент бокового увода шин $K_{ув}$ определяется по формуле:

$$K_{ув} = \frac{dF_y}{d\alpha_{ув}}$$

где F_y — боковая сила, Н; $\alpha_{ув}$ — угол бокового увода, ° (рисунок 7).

Тогда при фиксированном значении $\alpha_{ув}$ боковая сила определяется выражением

$$F_y = K_{ув} \cdot \alpha_{ув}$$

В соответствии с рисунком 7 и работой [15] приращение силы сопротивления качению составит:

$$\Delta F = F_y \cdot \sin(\alpha_{ув}) = K_{ув} \cdot \alpha_{ув} \cdot \sin(\alpha_{ув})$$

При скольжении управляемых шин под углом 1° и типичных значениях $K_{ув} = 1100$ Н/град приращение силы сопротивления качению передней оси составит 38,5 Н. В отсутствие увода сопро-

тивление качению ведущей оси массой 8000 кг и коэффициентом сопротивления качению 0,006 составляет 471 Н ($8000 \text{ кг} \cdot 0,006 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2$). Таким образом, приращение силы сопротивления качению колес при угле скольжения, равном 1°, составит 8,2 %. Поскольку при малых углах увода $\alpha_{ув}$ и $\sin(\alpha_{ув})$ примерно равны, то это приращение по указанной формуле будет пропорционально второй степени угла увода.

Поэтому данное обстоятельство необходимо учитывать при создании математических моделей для описания сопротивления качению шин в составе компьютерных моделей, предназначенных для расчета расхода топлива в эксплуатационных режимах движения. Количество подобных маневров на единицу пути (например, на 100 км) должно определяться на основе анализа статистических данных.

Также необходимо учитывать в этих моделях и флуктуации коэффициента аэродинамического сопротивления при встречном движении автопоездов. Выполненные расчеты показали, что при скорости бокового ветра 5...7 км/ч, набегающего под прямым углом к трассе, происходит увеличение коэффициента C_x до 10...13 %. Влияние бокового ветра на аэродинамические характеристики транспортного средства необходимо учитывать и при движении по мостам, как показано в работе [16].

Следующий пример демонстрирует возможности расчетного моделирования при анализе и проверке соответствия параметров системы вентиляции, отопления и кондиционирования требованиям нормативных документов. Аналогичные расчетные исследования, связанные с анализом

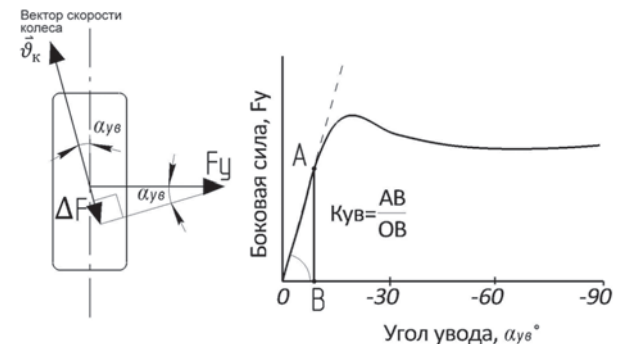


Рисунок 7 — Расчет боковой силы F_y
 Figure 7 — Calculation of the lateral force F_y

тепловых потоков, выполнялись и зарубежными исследователями [17–20].

На рисунке 8 *a* показана компьютерная модель, с помощью которой можно рассчитать скорости потока и температуру в контрольных точках кабины, которыми являются зоны головы, ног и пояса водителя и пассажира, а также температуры на спальном месте. Могут использоваться и дополнительные датчики, располагаемые в интересующих исследователя зонах.

На рисунке 8 *b* в целях верификации расчетной модели показаны результаты расчетных исследований (линии верхней и нижней границ диапазона) по оценке темпа прогрева воздуха кабины после ее выхолаживания до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, совмещенные с результатами натурных испытаний в климатической камере (линия «Кабина К5 Верификация»).

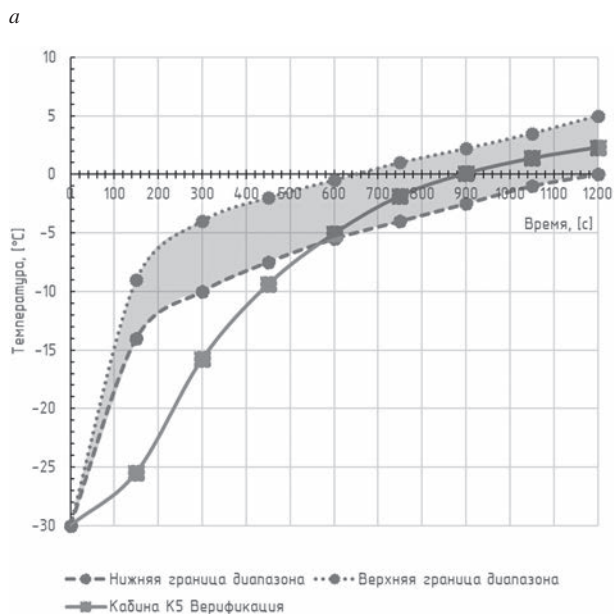
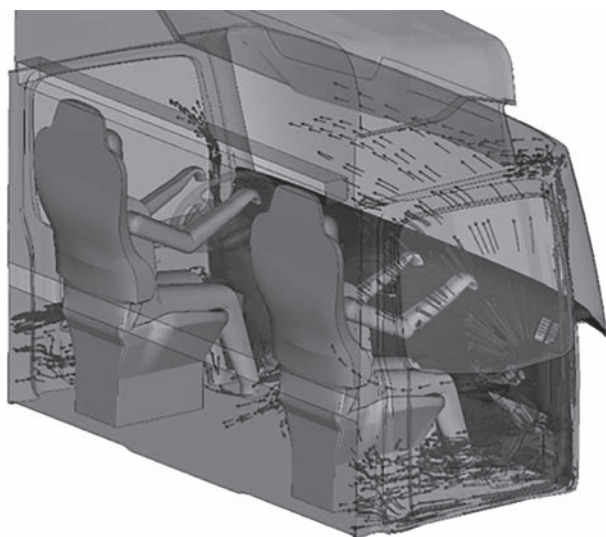


Рисунок 8 — Компьютерная модель (*a*) и график темпа прогрева воздуха в кабине (*b*)
 Figure 8 — Computer model (*a*) and graph of the cabin air heating rate (*b*)

ция»). Приведенные результаты показывают, что в течение первых 600 с процесса прогрева кабины расчетные данные расположены выше экспериментальных, а после этого момента они находятся в хорошем соответствии с экспериментом. Верхняя и нижняя границы диапазона определены при различных положениях воздушных заслонок системы.

Кроме оценки темпа прогрева кабины, с помощью этой же модели производится сравнение расчетных и экспериментальных данных в режимах выхолаживания и кондиционирования кабины. На рисунке 9 *a* представлены зависимости температуры от времени при работе кондиционера на максимальном режиме. Расчетные данные представлены зоной между линиями нижней и верхней границ диапазона, экспериментальные — линией «Кабина К5 Верификация». Нижняя кривая соответствует температуре в зоне ног водителя. Полученные результаты и в этом случае подтверждают приемлемую погрешность расчетной модели. Аналогичный вывод можно сделать и на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных на рисунке 9 *b*, полученных в режиме выхолаживания кабины.

С целью валидации получаемых результатов расчетов силы аэродинамического сопротивления

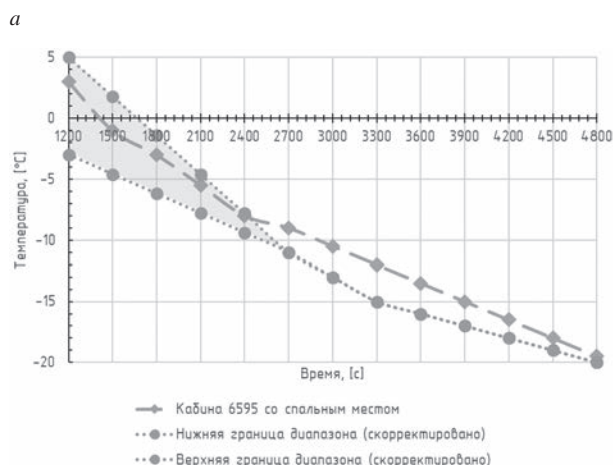
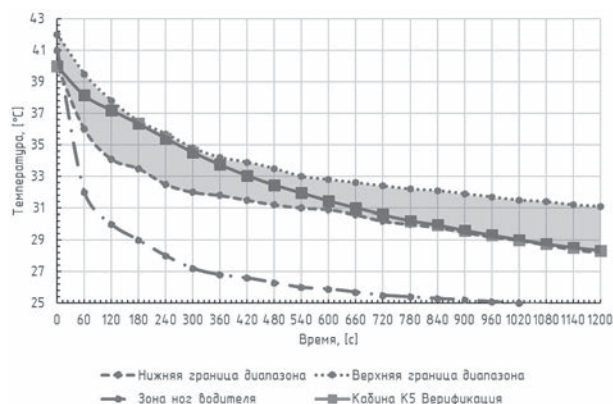


Рисунок 9 — Режим кондиционирования (*a*) и темп выхолаживания (*b*)
 Figure 9 — Conditioning mode (*a*) and cooling rate (*b*)

с использованием другого программного продукта — ANSYS CFD (рисунок 10 *a*) — выполнено их сравнение с экспериментальными данными. Сила аэродинамического сопротивления по расчетным данным составила 7,67 Н, а при продувке масштабной модели 1:20 (см. рисунок 10 *b*) в аэродинамической трубе — 7,81 Н. Отсюда следует, что разница между этими величинами не превышает 1,0 %.

Для валидации расчетных моделей используется различное исследовательское оборудование. Одним из сооружений является климатическая камера, представленная на рисунке 11 *a*. Она позволяет осуществлять выхолаживание и нагрев объектов испытаний от -50 до $+50$ °С в соответствии с целями и программами-методиками испытаний. Для измерения поля температур одновременно в нескольких точках используются термопары, данные от которых передаются на многоканальный регистратор (см. рисунок 11 *b*). Скорости потока измеряются с помощью анемометров (см. рисунок 11 *c*) или трубок Пито–Прандтля и батарейных манометров.

Рассмотрим другой пример. Известно, что коэффициент использования грузоподъемности ав-

томобилей-самосвалов, как правило, близок к 0,5: в одну сторону он движется с грузом, обратно — без него. Задний борт самосвальной платформы многих КТС установлен под прямым углом к днищу и при движении без груза является существенным источником аэродинамического сопротивления. Для оценки влияния заднего борта на коэффициент аэродинамического сопротивления выполнены сравнительные расчеты транспортного средства с закрытой и открытой платформой. Результаты расчетов приведены на рисунке 12.

Представленные на рисунке 12 *a* результаты показывают, что на внутренней поверхности заднего борта с открытой платформой интенсивным вихревым движением потоков воздуха внутри

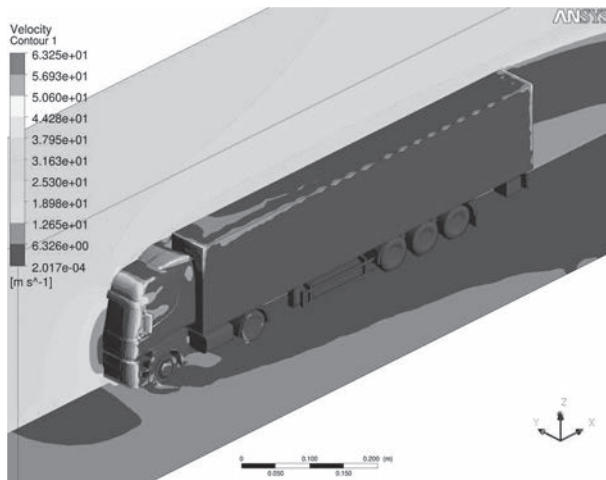
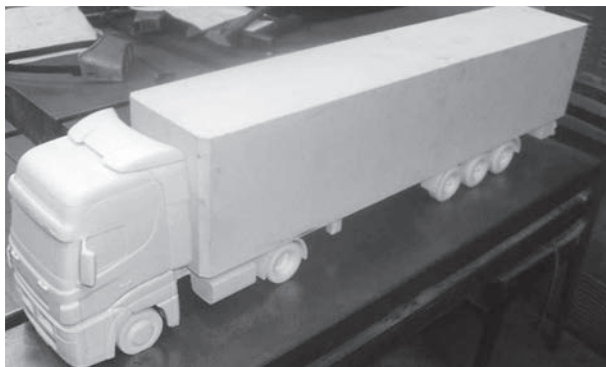
*a**b*

Рисунок 10 — Компьютерная модель автопоезда в набегающем потоке (*a*) и его масштабная модель 1:20 (*b*)

Figure 10 — Computer model of a road train in an incoming stream (*a*) and its 1:20 scale model (*b*)

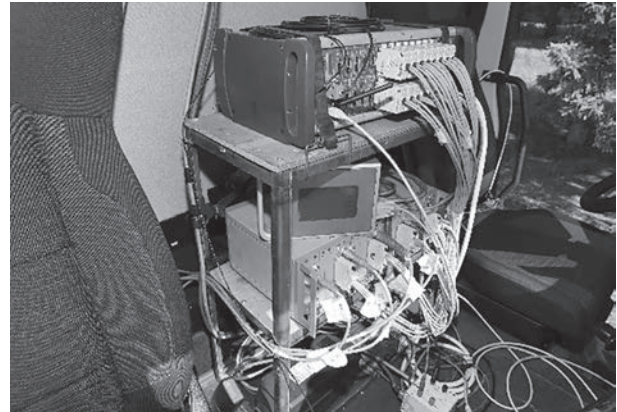
*a**b**c*

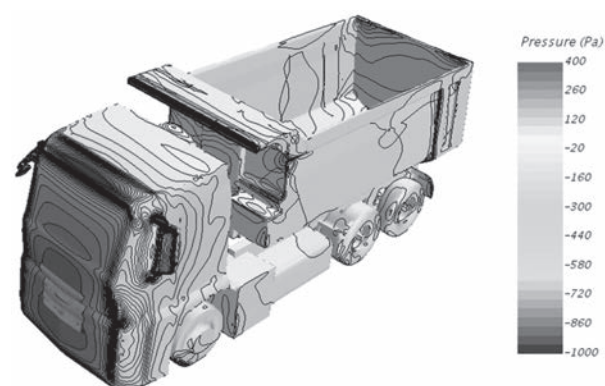
Рисунок 11 — Инструменты верификации расчетных моделей: *a* — климатическая камера; *b* — регистратор данных; *c* — измеритель скорости

Figure 11 — Calculation model verification tools:

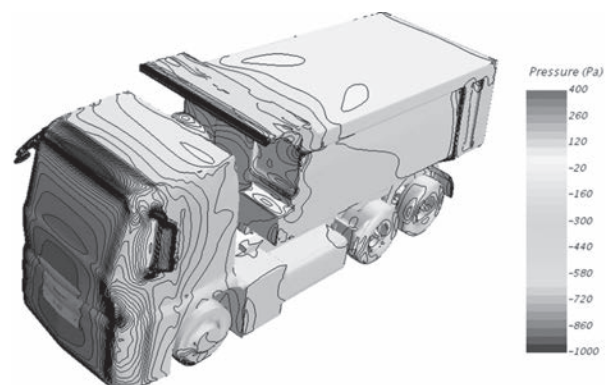
a — climate chamber; *b* — data logger; *c* — speed meter

платформы (см. рисунок 12 *c*) создается избыточное давление. Обтекание КТС с закрытой платформой является более плавным (см. рисунок 12 *b*), поэтому коэффициент C_x в этом случае на 10–12 % меньше, по сравнению с КТС с открытой платформой. В предположении, что доля аэродинамического сопротивления в топливном балансе может достигать 30 %, реализация на практике подобного мероприятия может обеспечить до 1,5...2,0 % экономии топлива.

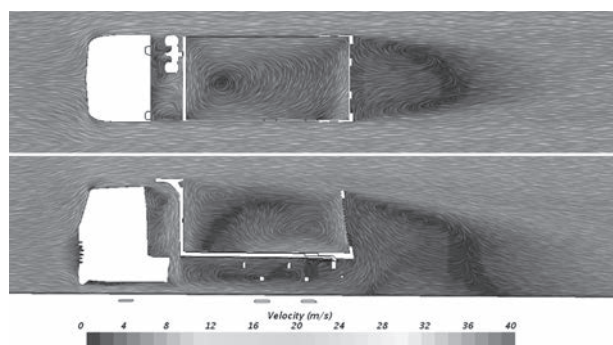
Развитие и совершенствование методов расчетных и экспериментальных исследований аэродинамических характеристик в практике проектирования автомобильной техники на предприятии всегда было направлено на улучшение аэродинамических характеристик, в первую очередь —



a



b



c

Рисунок 12 — Распределение давления с открытой платформой (*a*) и с закрытой платформой (*b*) и векторов скорости (*c*) с открытой платформой

Figure 12 — Pressure distribution with open platform (*a*) and closed platform (*b*) and velocity vectors (*c*) with open platform

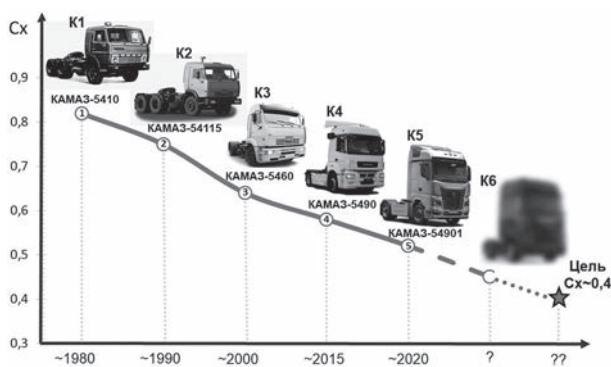


Рисунок 13 — Величина C_x магистральных автопоездов поколений K1–K6

Figure 13 — C_x value of mainline road trains of generations K1–K6

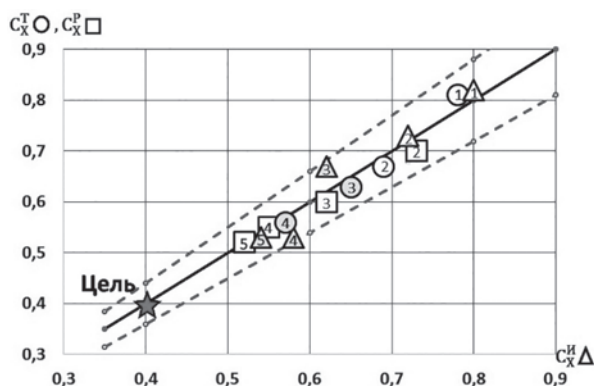


Рисунок 14 — Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Figure 14 — Comparison of calculated and experimental data

уменьшение аэродинамического сопротивления. Наглядное тому подтверждение — рисунок 13, на котором представлена динамика уменьшения коэффициента C_x магистральных автопоездов КАМАЗ от поколения K1 до поколения K5 с прогнозом на автопоезда поколения K6 ($C_x = 0,45$). Целевое значение C_x для следующего за K6 поколения — не выше 0,35...0,40 при отсутствии бокового ветра. На основании приведенных данных следует, что коэффициент аэродинамического сопротивления автопоездов поколения K5 на 40 % меньше, чем у поколения K1.

На рисунке 14 приведено сравнение расчетных C_x^P данных (квадратики) с результатами испытаний в аэродинамических трубах C_x^T (кружочки) и в дорожных условиях C_x^{II} (треугольники). Цифры внутри кружочков на линии тренда (см. рисунок 13) введены для идентификации поколений, и они соответствуют цифрам внутри символов на графике (см. рисунок 14). Анализ приведенной информации свидетельствует о приемлемой погрешности применяемого комплекса расчетных и экспериментальных исследований.

Заключение. При обтекании грузовых автомобилей и автопоездов формируется восходящий от арок передних колес поток воздуха, который переносит мелкие частицы пыли и грязи на зеркала, боковые стекла и в систему питания двигателя воздухом. Это явление необходимо учитывать при

выборе мест расположения зеркал, воздухозаборных устройств и видеокамер высокоавтоматизированного транспорта.

Различие между расчетными и экспериментальными данными достигает 12 %. Вместе с тем результаты расчетных исследований и испытаний их масштабных моделей в аэродинамических трубах и натуральных образцов в дорожных условиях не противоречат друг другу. Поэтому применяемые расчетные методы обеспечивают приемлемую для инженеров и дизайнеров точность.

Для дальнейшего повышения точности расчетов необходимо учитывать вращение колес, карданных валов, вентиляторов систем охлаждения и отопления, забор воздуха в систему питания двигателя, подвижность стенок фургонов (тента), естественную турбулентность атмосферы.

Коэффициенты аэродинамических сил необходимо рассчитывать с учетом среднестатистических данных по направлению и скорости ветра, которые можно получить на основании розы ветров в регионе. Поэтому в тягово-динамических расчетах коэффициент C_x необходимо увеличивать на 5–6 % относительно значений, полученных в отсутствие ветра. Эта величина требует дополнительного уточнения и обоснования применительно к различным типам КТС.

Все виды расчетов транспортных средств и их компонентов необходимо валидировать. Это позволяет уточнить расчетные модели (размеры сетки, модели турбулентности) и на следующей итерации выполнять более выверенные расчеты.

Динамические нагрузки, возникающие при встречном движении автопоездов, достаточно высоки, и их надо учитывать при расчете управляемости из-за нестационарного характера изменения C_x в достаточно широком диапазоне и расчете расхода топлива в связи с увеличением на 8,2 % сопротивления качению из-за возникающего бокового увода шин управляемой оси всего на 1°.

Уменьшение C_x автопоездов КАМАЗ поколения К5, по сравнению с поколением К1, составило ~40 %. Для других транспортных средств получены аналогичные значения. Целевое значение C_x для автопоездов поколения К6 — 0,45, а для следующего поколения — порядка 0,35...0,40.

Нормативная база в части исследований аэродинамических свойств и комплектующих элементов требует дальнейшего развития. Нужны единые отраслевые методики расчетно-экспериментальных исследований аэродинамических характеристик, причем не только в отечественной промышленности, и не только КТС.

Список литературы

1. Бендерский, Б.Я. Аэродинамика наземных транспортных средств. Курс лекций: учеб. пособие / Б.Я. Бендерский. — Ижевск: ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова, 2017. — 304 с.
2. Андрейчик, А.Ф. Методика и результаты расчетной оценки аэродинамических потерь в межзвенном пространстве сочлененного магистрального автопоезда / А.Ф. Андрейчик,

- С.В. Харитончик, А.В. Шмелёв // Автомобильная промышленность. — 2016. — № 6 — С. 21–25.
3. Андрейчик, А.Ф. Влияние межзвенного пространства на аэродинамику многозвенного автопоезда / А.Ф. Андрейчик, А.В. Шмелев, С.В. Харитончик // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Мн., 2015. — Вып. 4. — С. 121–125.
4. Моделирование аэродинамики магистрального автопоезда / В.А. Бабенко, Т.А. Баранова, Ю.В. Жукова [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 2(11). — С. 72–75.
5. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев. — СПб.: БГТУ, 2001. — 107 с.
6. Automotive aerodynamics analysis using two commonly used commercial software / A. Loya, A. Iqbal, M.T. Nasir [et al.] // Engineering. — 2020. — Vol. 11, no. 1. — P. 22–32. — DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2019.111003>.
7. Ranjan, A.K. Application of computation fluid dynamics approach in automobile sector: a review / A.K. Ranjan, D. Rathore // International Journal of Research Publication and Reviews. — 2021. — Vol. 2, iss. 10. — P. 18–22.
8. A computational fluid dynamics methodology to predict automotive painting process using Simcenter STAR-CCM+ / T.A.S. Vieira, P.H. Araújo, A. Abdu [et al.] // SAE Technical Paper. — 2024. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2023-36-0056>.
9. Schuetz, T. Aerodynamics of road vehicles / T. Schuetz. — 5th ed. — SAE International, 2016. — 1289 p.
10. Frolov, V.A. Drag coefficient of a cylinder with a flat plate behind it / V.A. Frolov, L.V. Ha // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2023. — Vol. 64, iss. 6. — P. 993–999. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894423060081>.
11. Демьянчук, О.В. Компьютерное моделирование обтекания воздушным потоком вагонов различных типов / О.В. Демьянчук // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Мн., 2025. — Вып. 14. — С. 247–250.
12. Ле, В.Х. О влиянии дефлекторов, расположенных вблизи поверхности цилиндра, на сопротивление системы «цилиндр-пластина» / В.Х. Ле, В.А. Фролов // Труды МАИ. — 2024. — № 134. — URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178469> (дата обращения: 07.08.2025).
13. Цифровые двойники – основа принятия оптимальных технических решений и повышения финансовой эффективности разработок / В.М. Гуреев, Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов [и др.] // Международный форум Kazan Digital Week – 2023: сб. материалов / сост.: Р.Ш. Ахмадиева, Р.Н. Минниханов. — Казань, 2023. — Ч. 1. — С. 313–323.
14. Карабцев, В.С. Расчетно-экспериментальные методы исследований аэродинамических характеристик колесных транспортных средств и их компонентов / В.С. Карабцев // Механика машин, механизмов и материалов. — 2025. — № 4(73). — С. 31–42. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-31-42>.
15. Gillespie, T.D. Fundamentals of vehicle dynamics / T.D. Gillespie. — Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. — 450 p.
16. The aerodynamic characteristics of road vehicles overtaking on bridge deck under crosswind / N. Chen, H. Sun, X. Wang, L. Zhang // Advances in Civil Engineering. — 2020. — Vol. 2020, iss. 1. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8847219>.
17. Effective deicing of vehicle windows and thermal response of asymmetric multilayered transparent-film heaters / G. Kim, J.W. Lim, C. Yeon [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2019. — Vol. 774. — P. 1092–1101. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.380>.
18. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part I: Test/numerical model and validation / H. Zhang, L. Dai, G. Xu [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2009. — Vol. 29, iss. 10. — P. 2022–2027. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.005>.
19. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part II: Simulation results and discussion / H. Zhang, L. Dai, G. Xu [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2009. — Vol. 29, iss. 10. — P. 2028–2036. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.006>.
20. Combined aero and underhood thermal analysis for heavy duty trucks. Final CRADA Report / Argonne National Laboratory. — URL: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/02/133609.pdf> (date of access: 10.08.2025).

KARABTSEV Vladimir S., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Design and Research Calculations Department¹

Associate Professor of the Information Systems Department²

E-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru

¹KAMAZ PTC, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation

²Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Received January 15, 2026.

COMPUTATIONAL METHODS FOR STUDYING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WHEELED VEHICLES AND THEIR COMPONENTS

The process of designing, manufacturing and operating automotive products in modern conditions is unthinkable without the introduction of computer technology at all stages of the life cycle. One of the key tasks in this case is to confirm the compliance of the product being developed with the requirements imposed on it using validated computational models at the earliest stages of design. The article uses several examples to show the experience of using computational studies of the aerodynamic characteristics of vehicles and their components. The obtained calculation results are compared with the available experimental data. Recommendations have been developed to improve the accuracy of calculations for estimating fuel consumption.

Keywords: wheeled vehicle, *WV*, flow velocity, aerodynamic drag coefficient, pressure distribution, validation

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-2-75-24-33>

References

- Benderskiy B.Ya. *Aerodinamika nazemnykh transportnykh sredstv. Kurs lektsiy* [Aerodynamics of ground vehicles. A course of lectures]. Izhevsk, Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet imeni M.T. Kalashnikova Publ., 2017. 304 p. (in Russ.).
- Andreichik A.F., Haritonchik S.V., Shmelev A.V. Metodika i rezultaty raschetnoy otsenki aerodinamicheskikh poter v mezhzvennom prostranstve sochlenennogo magistralnogo avtopoezda [Methodology and results of estimated assessment of aerodynamic losses into the trailer-trailer gap of the linked road vehicle]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2016, no. 6, pp. 21–25 (in Russ.).
- Andreichik A.F., Shmeliov A.V., Kharytonchik S.V. Vliyaniye mezhzvennogo prostranstva na aerodinamiku mnogozvennogo avtopoezda [The estimated assessment of aerodynamic losses into the trailer-trailer gap of the linked road vehicle]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2015, iss. 4, pp. 121–125 (in Russ.).
- Babenko V.A., et al. Modelirovaniye aerodinamiki magistralnogo avtopoezda [Simulation of aerodynamics linehaul train]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2010, no. 2(11), pp. 72–75 (in Russ.).
- Belov I.A., Isaev S.A. *Modelirovaniye turbulentnykh techeniy* [Simulation of turbulent flows]. Saint Petersburg, Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2001. 107 p. (in Russ.).
- Loya A., et al. Automotive aerodynamics analysis using two commonly used commercial software. *Engineering*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2019.111003>.
- Ranjana A.K., Rathore D. Application of computation fluid dynamics approach in automobile sector: a review. *International journal of research publication and reviews*, 2021, vol. 2, iss. 10, pp. 18–22.
- Vieira T.A.S., et al. *A computational fluid dynamics methodology to predict automotive painting process using Simcenter STAR-CCM+*. SAE Technical Paper, no. 2023-36-0056, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4271/2023-36-0056>.
- Schuetz T. *Aerodynamics of road vehicles*. SAE International, 2016. 1289 p.
- Frolov V.A., Ha L.V. Drag coefficient of a cylinder with a flat plate behind it. *Journal of applied mechanics and technical physics*, 2023, vol. 64, iss. 6, pp. 993–999. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894423060081>.
- Dzemyanchuk V.U. Kompyuternoe modelirovaniye obtekaniya vozdushnym potokom vagonov razlichnykh tipov [Computer simulation of air flow around different types of railway cars]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2025, iss. 14, pp. 247–250 (in Russ.).
- Le V.H., Frolov V.A. O vliyaniy deflektorov, raspolzhenykh vblizi poverkhnosti tsilindra, na soprotivlenie sistemy “tsilindr-plastiny” [The influence of deflectors located near cylinder on drag of combination “cylinder-plates”]. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178469> (accessed August 7, 2025) (in Russ.).
- Gureev V.M., et al. Tsifrovyye dvoyniki – osnova priyatiya optimalnykh tekhnicheskikh resheniy i povysheniya finansovoy effektivnosti razrabotok [Digital twins as the basis for optimal technical solutions and increased financial efficiency of developments]. *Proceedings of the international forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2023*, 2023, part 1, pp. 313–323 (in Russ.).
- Karabtsev V.S. Raschetno-eksperimentalnye metody issledovaniya aerodinamicheskikh kharakteristik kolesnykh transportnykh sredstv i ikh komponentov [Computational and experimental methods for studying the aerodynamic characteristics of wheeled vehicles and their components]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2025, no. 4(73), pp. 31–42. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-31-42> (in Russ.).
- Gillespie T.D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, Society of Automotive Engineers, 1992. 450 p.
- Chen N., Sun H., Wang X., Zhang L. The aerodynamic characteristics of road vehicles overtaking on bridge deck under crosswind. *Advances in civil engineering*, 2020, vol. 2020, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8847219>.
- Kim G., et al. Effective deicing of vehicle windows and thermal response of asymmetric multilayered transparent-film heaters. *Journal of alloys and compounds*, 2019, vol. 774, pp. 1092–1101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.380>.
- Zhang H., et al. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part I: test/numerical model and validation. *Applied thermal engineering*, 2009, vol. 29, iss. 10, pp. 2022–2027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.005>.
- Zhang H., et al. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part II: simulation results and discussion. *Applied thermal engineering*, 2009, vol. 29, iss. 10, pp. 2028–2036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.006>.
- Vegendla P., Sofu T. *Combined aero and underhood thermal analysis for heavy duty trucks. Final CRADA report*. Available at: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/02/133609.pdf> (in Russ.).