

УДК 629.01.02

В.С. КАРАБЦЕВ, канд. техн. наук, доц.

руководитель службы конструкторских и научно-исследовательских расчетов¹доцент кафедры информационных систем²

E-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация²Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация

Поступила в редакцию 13.10.2025.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Аэродинамика оказывает влияние на многие потребительские свойства транспортных средств и их компонентов — расход топлива, внешний вид, динамику, управляемость, комфорт водителя и пассажиров, а также безопасность, поэтому разработчики затрачивают огромные финансовые средства на продувки натурных образцов и масштабных моделей в аэродинамических трубах и проведение лабораторно-дорожных испытаний на дорогах полигонов. Все большее распространение получает численное моделирование с применением мощных компьютеров, направленное на доводку формы кабин транспортных средств и внешних аэродинамических устройств на ранних стадиях проектирования. В статье представлены обзор методов экспериментальных исследований аэродинамических характеристик транспортных средств и их компонентов и полученные результаты исследований.

Ключевые слова: колесное транспортное средство, аэродинамические характеристики, методы исследований, испытания натурных образцов и моделей, коэффициент аэродинамического сопротивления, выбег, распределение давления

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-31-42>

Введение. В последние десятилетия конструкторскими коллективами все больше внимания уделяется внешнему облику колесных транспортных средств (КТС) — грузовых и легковых автомобилей, автобусов и электробусов. Делается это как для минимизации потребления топлива, расходаемого на преодоление различных видов аэродинамического сопротивления (сопротивления формы, определяемого внешним обтеканием; сопротивления трения на внешних поверхностях; сопротивления воздушных потоков в кабинах и салонах; сопротивления внутренних потоков в моторном отсеке), так и для повышения комфорта водителя и пассажиров, безопасности движения.

Из теории и практики известно, что внешняя и внутренняя аэродинамика оказывает влияние не только на расход топлива, но и на другие потребительские свойства КТС и состояние его систем и компонентов: на динамические качества, особенно при сильном боковом ветре; загрязнение боковых поверхностей, стекол, зеркал заднего вида; накопление пыли, грязи и снега в застойных зонах; уровни внешнего и внутреннего шума; систему питания двигателя воздухом; систему вен-

тиляции, отопления и поддержания микроклимата в кабине; систему охлаждения двигателя, охлаждение наддувочного воздуха; теплонапряженность тормозных механизмов, сцепления.

Актуальность работы. Для исследований основных аэродинамических характеристик КТС — продольной, боковой и вертикальной сил и моментов этих сил — в арсенале специалистов по аэродинамике и дизайнеров, определяющих стилевые решения с учетом законодательных и технологических ограничений, находится целый ряд технических средств — от новейших измерительно-вычислительных комплексов для проведения исследований в дорожных условиях до высокоскоростных аэродинамических труб с площадью сечения рабочей части порядка 35...40 м² и более. Имеются аэродинамические трубы, в которых помещаются полноразмерные автопоезда (рисунок 1 [1]). К сожалению, в Российской Федерации подобных сооружений нет: аэродинамическая труба ФГУП НАМИ не пригодна для грузовых КТС. Поэтому большая часть исследований выполнена при проведении дорожных испытаний КТС и исследовании их моделей в трубах.



Рисунок 1 — КТС в аэродинамической трубе
Figure 1 — Wheeled vehicle (WV) in the wind tunnel

С целью стандартизации проводимых исследований в зарубежной практике разработано большое количество нормативных и методических документов как для проведения исследований в аэродинамических трубах и компьютерного моделирования, так и для проведения испытаний в дорожных условиях. Полный перечень нормативных документов включает около трех десятков источников. Перечислим некоторые из них:

- SAE J1263_201003 Road Load Measurement and Dynamometer Simulation Using Coastdown Techniques;
- SAE J2263_202005 Road Load Measurement Using Onboard Anemometry and Coastdown Techniques;
- SAE J2971_201908 Aerodynamic Device and Concept Terminology;
- SAE J1252_201207 Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses;
- SAE J2978_202106 Truck and Bus Coastdown Procedure;
- SAE J2966_202106 Guidelines for Aero Assessment Using CFD.

Отечественная нормативная база выглядит намного скромнее. Прямое или косвенное отноше-

ние к исследуемым параметрам имеют следующие документы:

- ГОСТ Р 54810-2011 «Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний»;
- ОСТ 37.001.523-2000 «Автомобильные транспортные средства. Сопротивление качению и аэродинамическое сопротивление. Определение в дорожных условиях методом выбега»;
- ГОСТ 22576-90 «Автотранспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний».

Несмотря на наличие различных методов и инструментов исследований, механизм формирования аэродинамического сопротивления ввиду наличия высокой турбулентности потока и отрывных зон, в особенности применительно к грузовикам, изучен на сегодня не в полном объеме. Связано это с тем, что необходимость выполнения требований сертификации по безопасности, эргономики и технологии изготовления зачастую предопределяет выбор такой формы транспортного средства, обтекание которой встречным потоком воздуха сопровождается его трехмерным отрывом с острых кромок кабины, кузова (фургона), прицепа или полуприцепа.

По данным зарубежных исследователей [2] (рисунок 2), доля затрат на топливо в жизненном цикле магистрального автопоезда достигает 25–30 %. Эти данные находятся в хорошем соответствии с результатами исследований по оценке топливного баланса магистрального автопоезда КАМАЗ, представленного на рисунке 3, откуда следует, что без учета Q_d расход топлива на преодоление аэродинамического сопротивления Q_a при скорости 80 км/ч достигает 35...40 % в топливном балансе.

Из практики известно, что при снижении коэффициента аэродинамического сопротивления C_x КТС на 10 % расход топлива уменьшается примерно на 3 %. Тогда при среднем расходе 30 л/100 км экономия топлива составит более 1 л/100 км. Элементарным расчетом убеждаемся,

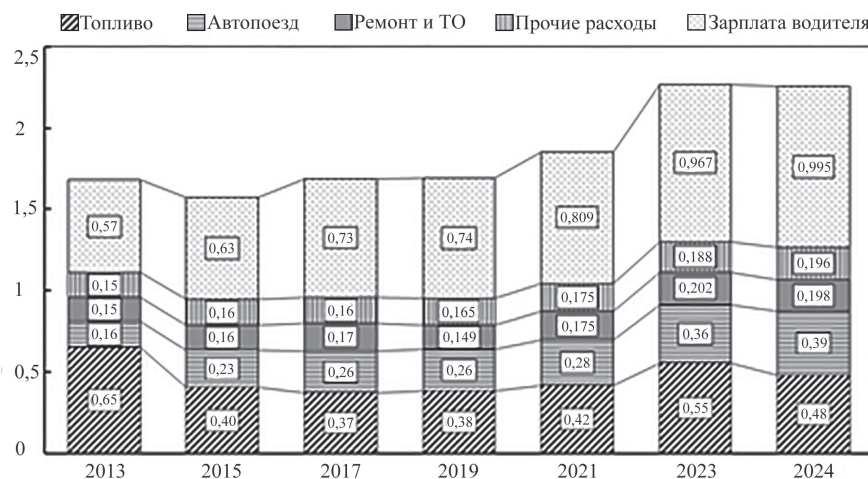


Рисунок 2 — Доля затрат на топливо по источнику [2]: Q_d — расход топлива двигателем; Q_t — затраты топлива на преодоление потерь в трансмиссии; Q_a и Q_m — расход топлива на преодоление сопротивления воздушной среды и силы сопротивления качению шин

Figure 2 — Share of fuel costs by source [2]: Q_d — fuel consumption of the engine; Q_t — fuel consumption to overcome losses in the transmission; Q_a and Q_m — fuel consumption to overcome the air resistance and rolling resistance of tires

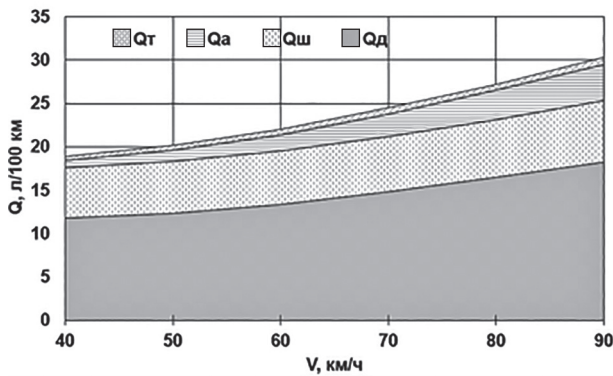


Рисунок 3 — Топливный баланс автопоезда
Figure 3 — Fuel balance of a road train

что при пробеге каждого из 100 тыс. автопоездов по 100 тыс. км/год можно получить экономию топлива порядка 7 млрд рос. руб. при цене топлива 70 рос. руб./л. За 10 лет экономия достигнет 70 млрд рос. руб. в текущих ценах. А с учетом 100 тыс. проданных ранее автомобилей экономия превысит 100 млрд рос. руб. С развитием сети скоростных магистралей и соответствующим ростом средних скоростей движения затраты будут только увеличиваться.

Грузовые КТС и автобусы относятся к классу плохобтекаемых тел, в отличие от самолетов или их элементов. Если улучшением аэродинамических характеристик легковых и спортивных (гоночных) автомобилей разработчики начали заниматься еще в 20–30-е годы XX века, то исследования аэродинамики грузовых КТС начали проводиться гораздо позже — примерно в конце 50–60-х годов.

До настоящего времени не в полной мере изучен механизм образования аэродинамического сопротивления и его составляющих — сопротивление трения, давления, внутренних потоков в кабине и салоне. Можно отметить также недостаточное понимание физических процессов и явлений при возникновении отрывных и обратных течений,

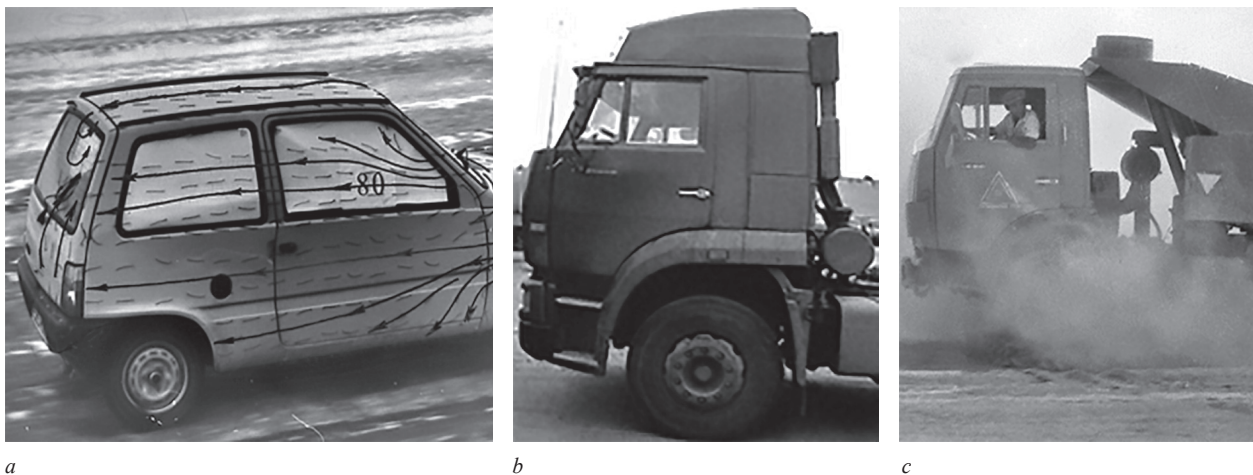
особенно в трехмерном потоке и при наличии подвижных границ из-за колебаний тента грузовой платформы. Кроме того, существует потребность в детальных исследованиях тепломассопереноса в моторном отсеке и колесных нишах.

Исторически сложилось так, что разработанные в авиационной отрасли методы исследований находили применение и дальнейшее развитие в изучении аэродинамических характеристик КТС. Эти методы подразделяются на качественные и количественные. И те, и другие можно отнести и к экспериментальным, и к расчетным, причем любой из них применим как к натурному образцу, так и к уменьшенной в определенном масштабе модели. Исследования натурных образцов можно проводить как в «полевых» условиях, на дорогах полигонов, так и в аэродинамических трубах. Численные исследования выполняются с помощью средств компьютерного моделирования.

Качественные методы исследований. Среди различных методов качественных исследований аэродинамических характеристик наземных транспортных средств можно выделить методы «шелковинок», визуализации линий тока с помощью дымовых струй, газовых струек, сублимации, визуального осмотра и фотографирования отложений пыли и грязи на поверхностях транспортного средства.

Исследования могут выполняться в аэродинамической трубе или в процессе движения КТС в условиях естественной турбулентности приземного слоя атмосферы. В последние годы все большее применение в практике проектирования находят численные методы. Подробную информацию о применяемых методах исследований и основных результатах можно найти в работах зарубежных ученых [3–11], исследователей Республики Беларусь [12–14], ученых Российской Федерации [15–18].

Примеры применения качественных методов исследований по оценке направления скорости потока и областей расположения отложений грязи,



a

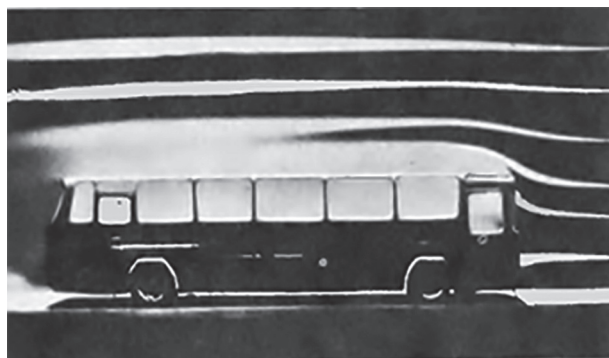
b

c

Рисунок 4 — Иллюстрация качественных методов исследований:
a — линии тока и направления потоков; b — отложения грязи на боковых поверхностях кабины; c — зоны запыленности
Figure 4 — Illustration of qualitative research methods:
a — current lines and flow directions; b — dirt deposits on the side surfaces of the cabin; c — dusty areas



a



b

Рисунок 5 — Визуализация потока на натурном образце (a) и модели автобуса (b)
Figure 5 — Visualization of the flow on a full-scale sample (a) and a bus model (b)

пыли на натуральных объектах различных транспортных средств представлены на рисунке 4.

На рисунке 5 *a* представлена структура потока в пограничном слое поверхностей кабины натурного образца автомобиля-самосвала, а на рисунке 5 *b* — масштабной модели автобуса, установленной в аэродинамической трубе [11]. Несмотря на то, что «шелковинки» показывают только направление потока, во многих случаях даже такой информации для специалистов оказывается достаточно для принятия решения о целесообразности применения, например, бокового обтекателя, с помощью которого формируется направленный вдоль боковой поверхности кабины поток, способный сдвигать поднимаемую колесами воду и частицы грязи.

Количественные методы исследований. В процессе исследований и доводки аэродинамических форм КТС широкое использование находят и количественные методы исследований. Как пример на рисунке 6 представлены модель КТС в аэродинамической трубе и схемы измерения давлений.

По аналогии с качественными, эти методы применимы и к натурным образцам, и к уменьшенным копиям. Однако оба метода имеют свои преимущества и недостатки.

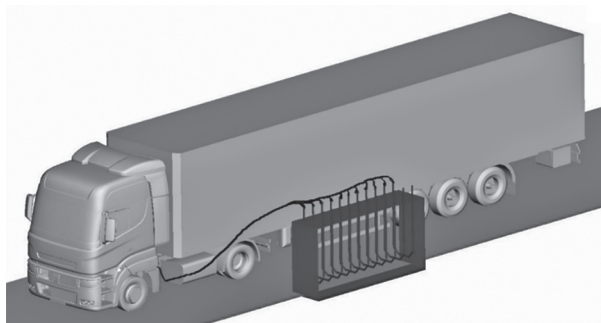
При проведении исследований в аэродинамических трубах турбулентность потока, как правило, минимальна и имеется возможность управления скоростью потока в рабочей части, поэтому обеспечива-



a



b



c

Рисунок 6 — Модель КТС в аэродинамической трубе в масштабе 1:10 (a), схема расположения дренажных отверстий в одном из сечений кабины (b) и схема сбора данных с помощью батарейного манометра (c)
Figure 6 — 1:10 scale model of a WV in the wind tunnel (a), diagram of the drainage holes in one of the sections of the cabin (b) and data acquisition scheme using a battery pressure gauge (c)

ется равномерность профиля скорости по площади сечения. Вместе с тем на получаемых результатах исследований сказывается влияние масштабного фактора и способа имитации дорожного полотна, степени загромождения рабочей части трубы, отсутствие вращения колес, вентиляторов.

При проведении исследований по определению сопротивления воздушной среды в лабораторно-дорожных условиях применялись и применяются различные методы [19], перечисленные на рисунке 7. Рассмотрим обзорно основные методы дорожных исследований.

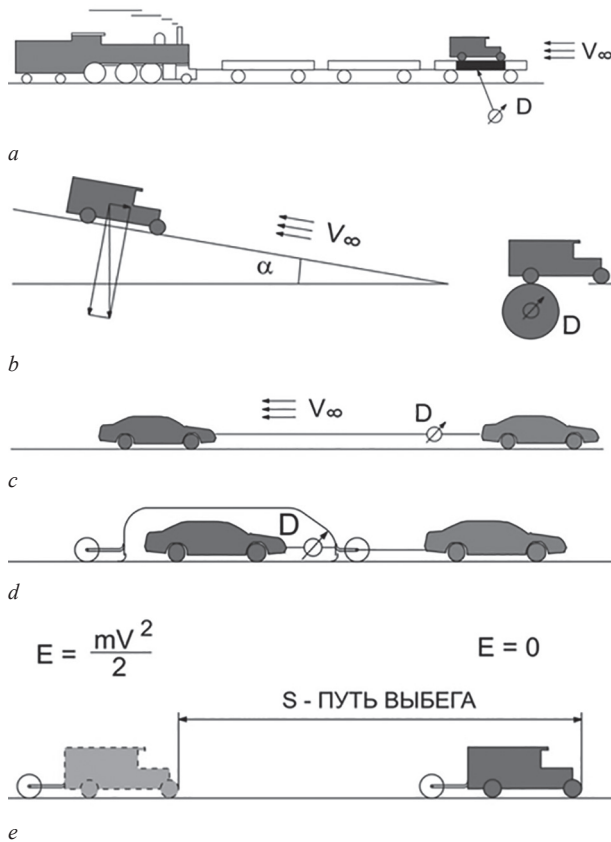


Рисунок 7 — Методы определения дорожного сопротивления:
 a — с помощью железнодорожной платформы; b — скатыванием с уклона; c — буксированием; d — с экраном доктора Фогга; e — выбегом

Figure 7 — Methods for determining road resistance:

a — using a railway platform; b — rolling downhill; c — towing; d — with a FogScreen; e — run-out

Перемещение КТС на плоской платформе, например железнодорожной, или на крыше другого транспортного средства. Для этого объект исследований монтируется на плоскую платформу с колесами, сзади которой располагается толкающий ее локомотив. Платформу без колес с объектом исследований или его масштабной моделью можно установить на крышу другого КТС. При установке КТС или его модели на платформу необходимо обеспечить возможность их перемещения относительно нее. Возникающие при этом перемещении усилия регистрируются с помощью динамометров. Показания датчиков соответствуют силе сопротивления воздушной среды движущегося объекта в зависимости от скорости движения.

Однако колебания платформы, возникающие при движении по дороге, нестационарный процесс регистрации усилий, а также взаимное влияние потоков, обтекающих автомобиль-тягач (локомотив) и объект исследований, приводят к существенным ошибкам измерения силы аэродинамического сопротивления. Поэтому данный метод может применяться в основном при сравнительных испытаниях в целях оценки влияния отдельных элементов конструкции на изменение относительной величины аэродинамического сопротивления.

Скатывание с уклона известной крутизны. При выбеге в процессе скатывания с уклона можно определить суммарную силу сопротивления движению КТС. Тогда при наличии данных о коэффициентах сопротивления качению шин и потерях в трансмиссии силу аэродинамического сопротивления определяют простым вычитанием потерь в трансмиссии и шинах из суммарной силы сопротивления.

Данный метод может применяться только если известны две составляющие сопротивления движению, а их определение представляет из себя в большинстве случаев довольно сложную задачу.

Буксирование с применением плавающего кузова. Соединенные жестко между собой кузов и кабина устанавливаются на шасси, относительно которого они могут перемещаться в продольном направлении. Под воздействием набегающего потока воздуха на буксируемое КТС кузов и кабина перемещаются относительно шасси. Возникающие при таком смещении силы аэродинамического сопротивления регистрируются с помощью датчиков.

Буксирование с применением плавающих осей. Объект исследований буксируется по прямолинейному горизонтальному участку дороги с помощью тягача. В процессе движения регистрируется сила тяги на крюке последнего. Одновременно с этим тензодатчиками регистрируются величины толкающих сил на оси колес буксируемого объекта. Разность указанных усилий позволяет определить аэродинамическое сопротивление.

Обоим методам буксирования присущи серьезные недостатки. Во-первых, при регистрации усилия в сцепном устройстве всегда неизбежны пульсации измеряемой силы, пропорциональные массе и габаритам КТС, приводящие к большой погрешности. Во-вторых, при буксировке исследуемого КТС оно всегда находится в спутной струе, формируемой тягачом, что порождает дополнительные ошибки. Поэтому указанные методы не получили широкого применения.

Применение аэродинамического экрана. Применяется этот метод поэтапно. На первом этапе объект буксируется тягачом на длинной сцепке с целью минимизации влияния буксирующего автомобиля. Установленный в сцепке динамометр (или другой прибор) необходим для измерения силы суммарного сопротивления движению КТС. На втором этапе объект исследований располагается под специальным аэродинамическим экраном, который через систему датчиков связан с КТС.

Наличие экрана исключает влияние аэродинамического сопротивления объекта исследований, т. к. при буксировании экрана с расположенным под ним КТС через систему датчиков регистрируются потери в трансмиссии и на качение шин. Вычитая из суммарной силы сопротивления движению указанные потери, можно определить и аэродинамическое сопротивление объекта исследований.

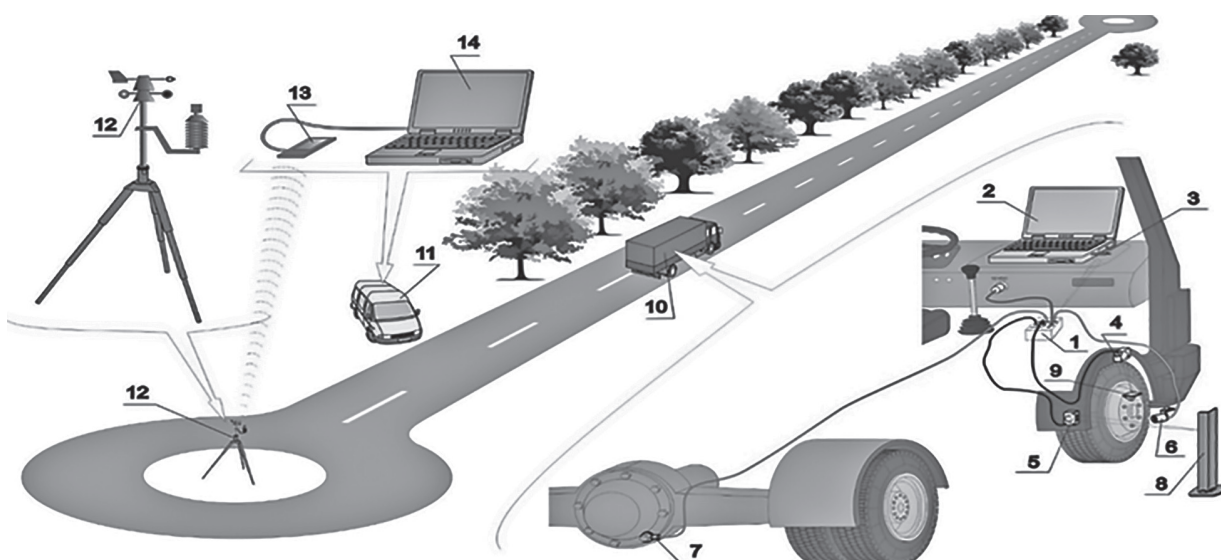


Рисунок 8 — Схема проведения испытаний: 1 — коллектор; 2 — ноутбук в кабине КТС; 3 — накопитель данных; 4 — колесный датчик; 5 — основной датчик; 7 — датчик температуры масла; 8 — дорожный световозвращатель; 9 — рефlector; 10 — объект испытаний; 11 — мобильная лаборатория; 12 — метеостанция; 13 — радиомодем; 14 — ноутбук в мобильной лаборатории
Figure 8 — Testing scheme: 1 — collector; 2 — laptop in the WV cabin; 3 — data storage; 4 — wheel sensor; 5 — main sensor; 7 — oil temperature sensor; 8 — road reflector; 9 — reflector; 10 — test object; 11 — mobile laboratory; 12 — weather station; 13 — radio modem; 14 — laptop in the mobile laboratory

К недостаткам метода можно отнести наличие существенных колебаний усилия в сцепном устройстве и взаимное влияние буксирующего и буксируемого КТС.

Метод выбега КТС по прямолинейному горизонтальному участку дороги с отсоединенным от трансмиссии двигателем, на нейтральной передаче в коробке передач (рисунок 8 [20]). Этот метод получил наибольшее распространение, в том числе и на ПАО «КАМАЗ», ввиду его доступности и приемлемой инженерной точности.

Результаты исследований. В конструкциях КТС для снижения аэродинамического сопротивления широко применяются навесные аэродинамические устройства. Схема установки различных аэродинамических устройств на одном из КТС представлена на рисунке 9. Это, в первую очередь, различные обтекатели — объемные 8 или щитовые 9, устанавливаемые на крыше кабины. Они предназначены для обеспечения плавного, по возможности безотрывного обтекания выступающей над кабиной части фургона. С целью

уменьшения вихреобразования на вертикальных передних кромках кабины и снижения загрязняемости ее боковой поверхности применяются боковые обтекатели 3. Над верхней кромкой ветрового стекла устанавливаются противосолнечные аэродинамические козырьки 1, на передней стенке фургона — обтекатели 10. Под бампером — металлические или пластиковые спойлеры 5, 6, ускоряющие воздушный поток под днищем. Гораздо меньшее распространение получили щиток крыла 4, подножка 7, обтекатели стоек ветрового стекла 2, щеток стеклоочистителей, зеркал, различные дефлекторы.

Результаты исследований представлены на рисунке 10. По результатам испытаний в режиме выбега (см. рисунок 10 б) получены следующие значения: $C_{ха/м1} = 0,771$; $C_{ха/м2} = 0,722$; $C_{ха/м4} = 0,685$.

В аэродинамической трубе при нулевом угле натекания α потока для этих же КТС получены значения C_x 0,725; 0,672 и 0,647 соответственно. Видим, что различие между значениями C_x , полученными разными методами, не превышает 6,0–7,4 %.

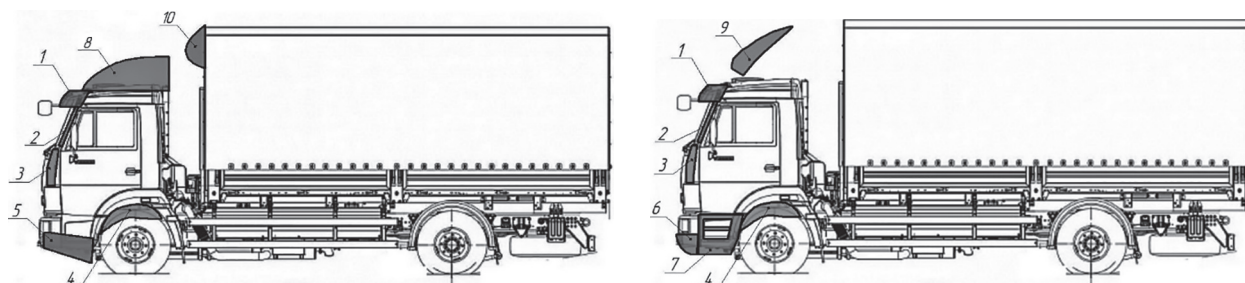
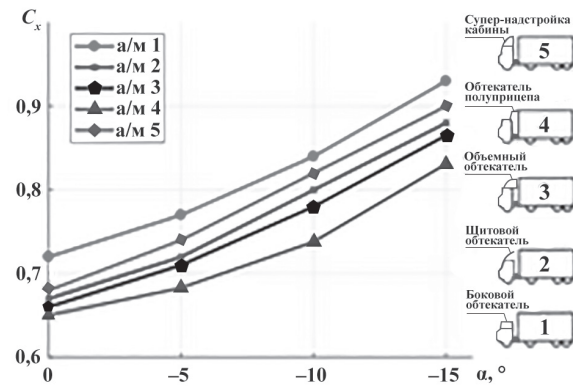
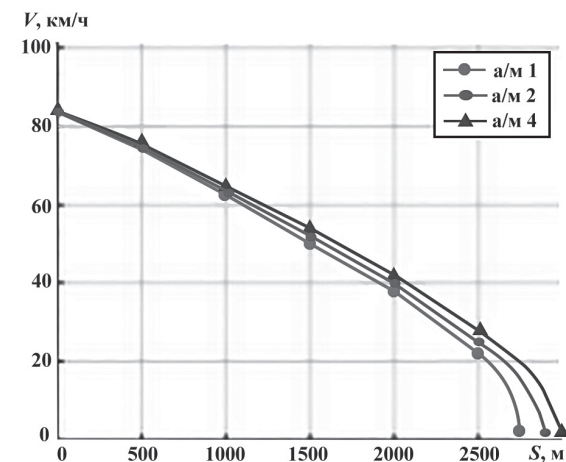


Рисунок 9 — Схема установки различных аэродинамических устройств: 1 — козырек аэродинамический; 2 — облицовка стойки ветрового стекла; 3 — обтекатель боковой; 4 — щиток переднего крыла; 5 — спойлер; 6 — нижний обтекатель буфера; 7 — подножка двухступенчатая; 8 — обтекатель объемный; 9 — обтекатель щитовой; 10 — обтекатель кузова

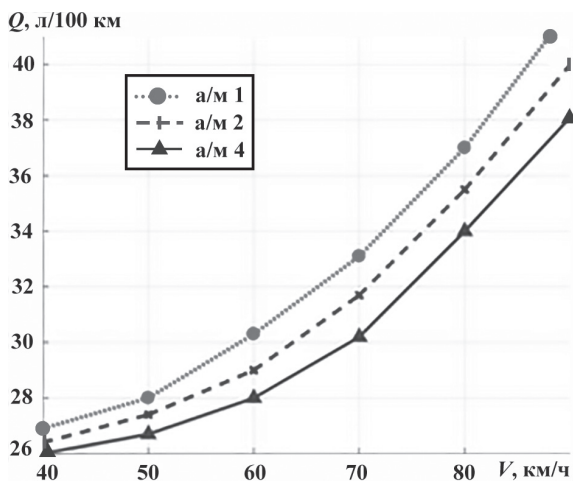
Figure 9 — Installation scheme of various aerodynamic devices: 1 — aerodynamic visor; 2 — windscreen pillar lining; 3 — side fairing; 4 — front wing flap; 5 — spoiler; 6 — lower buffer fairing; 7 — two-stage footrest; 8 — volumetric fairing; 9 — shield fairing; 10 — body fairing



a



b



c

Рисунок 10 — Результаты исследований:

a — по оценке коэффициента C_x в аэродинамической трубе ряда КТС; b — по оценке пути выбега в безветренную погоду трех КТС; c — по оценке расхода топлива

Figure 10 — Research results: a — by estimation of the C_x coefficient in the wind tunnel of a number of WV; b — by estimation of the escape path in calm weather of three WV; c — by estimation of fuel consumption

При этом результаты исследований в аэродинамической трубе показывают увеличение C_x до 30 % при изменении угла натекания α от 0 до 15°, причем зависимость близка к квадратичной. Этот факт необходимо учитывать при выполнении расчетов

расхода топлива на эксплуатационных маршрутах путем увеличения C_x на 5,0...6,0 % относительно данных, полученных при нулевом угле натекания. Применение аэродинамических устройств приводит к снижению расхода топлива до 6,0...7,0 %.

При этом суммарная мощность сопротивления движению по горизонтальной дороге в режиме выбега испытанных КТС поколения К2 и К3, необходимая для расчета C_x , определялась по формулам (1) и (2). Суммарная мощность N_B при выбегае автомобилей-самосвалов КАМАЗ в интервале скоростей от 30 до 90 км/ч полной массой от 22 до 35 т (колесные формулы 6×4 и 6×6) и самосвальных автопоездов может определяться с помощью формулы:

$$N_B = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \left\{ 26,0 + 1,1 \cdot (M_{\Pi} - 22,2) \times \left[1 + \left(1,6 + 1,05 \cdot \frac{M_T - 22,2}{M_T} \right) \cdot \frac{v - 30}{30} \right] \right\}, \quad (1)$$

где N_B — суммарная мощность сопротивления в режиме выбега, л. с.; M_T — масса тягача, т; M_{Π} — полная масса КТС с прицепом, т; v — скорость движения в интервале скоростей 30–90 км/ч;

$k_1 = 1 + 1,098 \cdot \frac{M_{\Pi P}}{M_T}$; $M_{\Pi P}$ — полная масса прицепа, т; $k_2 = 1,0$ для шин производства Российской Федерации и СНГ, $k_2 = 0,818$ для импортных (европейских) шин; $k_3 = 1,0$ для КТС колесной формулы 6×4, $k_3 = 1,091$ для КТС колесной формулы 6×6.

Суммарная мощность сопротивления N_B магистральных автомобилей и автопоездов КАМАЗ в режиме выбега может определяться с помощью выражения:

$$N_B = 244,0 - 11,936 \cdot M_{\Pi} - 0,5053 \cdot v + 0,0328 \cdot M_{\Pi} \cdot v + 0,1438 \cdot M_{\Pi}^2 + 0,0187 \cdot v^2. \quad (2)$$

Оценка коэффициента аэродинамического сопротивления C_x выполнялась в соответствии с методикой, изложенной в работе [21]. Следует отметить, что для КТС семейств К4 и К5 формулы (1) и (2) не применимы.

Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления C_x в дорожных условиях применялись и другие методы. В основе одного из них лежит теорема импульсов, применяемая в аэродинамике. Суть метода заключается в том, что за испытываемым КТС 1 в спутной струе на расстоянии 5–7 м с помощью специального сцепного устройства 5 буксируется тележка 8, внутри которой расположен батарейный манометр (см. рисунок 6 c) для регистрации величин скорости в контрольных точках сечения IV датчиками 3 (трубки Пито–Прандтля), расположенными на поворачивающейся вокруг своей оси штанге 2 (рисунок 11).

В соответствии с теоремой импульсов сила аэродинамического сопротивления по направлению оси x определяется по формуле:

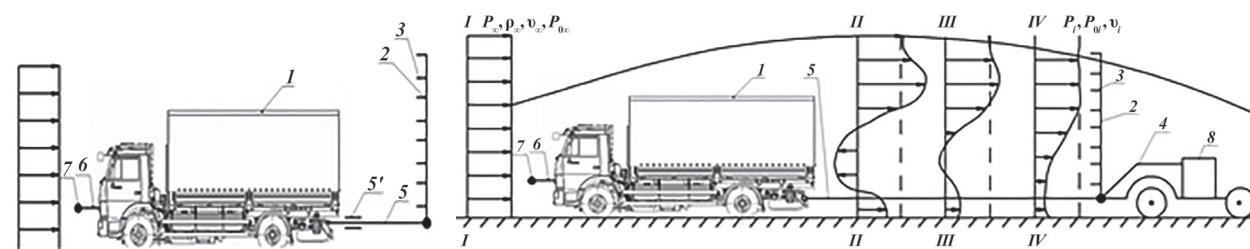


Рисунок 11 — Схема измерения параметров потока в спутной струе: 1 — КТС; 2 — штанга; 3 — датчик скорости;

4 — тележка; 5 — поворотное и сцепное устройство; 6, 7 — кронштейн и датчик скорости невозмущенного потока;

8 — тележка и регистрирующая аппаратура

Figure 11 — Flow measurement scheme in a slipstream: 1 — WV; 2 — rod; 3 — speed sensor; 4 — trolley; 5 — rotary and coupling device; 6, 7 — bracket and undisturbed flow velocity sensor; 8 — trolley and recording equipment

$$F_x = 2 \cdot \int_S \sqrt{P_{0i} - P_i} \cdot (\sqrt{P_{0\infty} - P_\infty} - \sqrt{P_{0i} - P_\infty}) dS, \quad (3)$$

где $P_{0\infty}$, P_∞ — полное и статическое давление невозмущенного потока в сечении I, Па; P_i , P_{0i} — полное и статическое давление в i -й контрольной точке, Па; S — площадь спутной струи, м².

Скорость в контрольной точке равна

$$v_{ix} = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{0i} - P_i)}{\rho_\infty}}, \quad (4)$$

где $\rho_\infty = \frac{B + P_\infty}{R \cdot T_\infty}$ — плотность невозмущенного потока, кг/м³; R — универсальная газовая постоянная, равная 287 Дж/(кг·К); B — барометрическое давление, Па; T_∞ — температура невозмущенного потока, °К.

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x рассчитывается по формуле:

$$C_x = \frac{F_x}{q_\infty \cdot S}, \quad (5)$$

где S — площадь сечения, м²; $q_\infty = \frac{\rho_\infty \cdot v_\infty^2}{2}$ — скоростной напор, Па; $v_\infty = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{0\infty} - P_\infty)}{\rho_\infty}}$ — скорость на бесконечности, м/с.

Значительный объем исследований выполнен и в процессе лабораторно-дорожных испытаний по оценке распределения давления по поверхностям кузова и грузовой платформы различных КТС. Коэффициент давления C_p определялся по формуле:

$$C_p = \frac{P_i - P_\infty}{0,5 \cdot \rho \cdot v_\infty^2}, \quad (6)$$

где P_i — статическое давление в i -й контрольной точке на поверхности кабины/кузова, Па; P_∞ — давление в невозмущенном потоке, Па; ρ — плотность воздуха, кг/м³. Плотность воздуха определяется по формуле:

$$\rho = \frac{0,4642 \cdot P}{273 + t},$$

где P — атмосферное давление, мм. рт. ст.; t — температура окружающей среды, °С.

Преимущество использования величин C_p состоит в том, что этот параметр не зависит от скорости движения автомобиля и позволяет наглядно представить зоны повышенных и пониженных давлений на поверхности кабины, кузова и других элементов. Скорость потока определялась в соответствии с уравнением Бернулли для каждого датчика.

Величины давлений P_i и P_∞ определяются по отношению к давлению P_k в кабине автомобиля при его движении с заданной скоростью. Это позволяет определить перепады давлений $P_i - P_k$ и $P_\infty - P_k$, что, в свою очередь, определяет искомый перепад $P_i - P_\infty$:

$$P_i - P_\infty = (P_i - P_k) - (P_\infty - P_k) = \Delta P. \quad (7)$$

Определение перепада давлений $P_i - P_\infty$ через опорное давление P_k позволяет в два раза уменьшить количество пневмотрасс (пневмопроводов, соединяющих датчик и регистрирующий прибор). Давления P_i измеряются специальными датчиками давления, которые с помощью герметика крепятся в контрольных точках поверхности кабины или кузова.

Сигнал от датчика по пневмотрассе передается на одно из колен U-образных манометров, на другое колено подается давление P_k . Двадцать U-образных манометров объединены в батарейный манометр, что позволяет одновременно фиксировать до двадцати перепадов давлений по величине разности уровней воды в коленах манометра (Δh , мм. вод. ст. или Па). Перепад давлений ΔP связан с разностью уровней воды в коленах манометра выражением $\Delta P = \gamma(\Delta h)$, где γ — удельный вес воды, равный 9,81 Н/дм³.

Схема расположения контрольных точек в различных продольных и поперечных сечениях представлена на рисунке 12, результаты исследований по оценке распределения коэффициента давления для характерных сечений двух КТС различной конфигурации — на рисунке 13.

Представленное на рисунке 14 а распределение давления по боковой поверхности грузового и легкового автомобиля указывают на наличие восходящих от колесных ниш потоков воздуха,

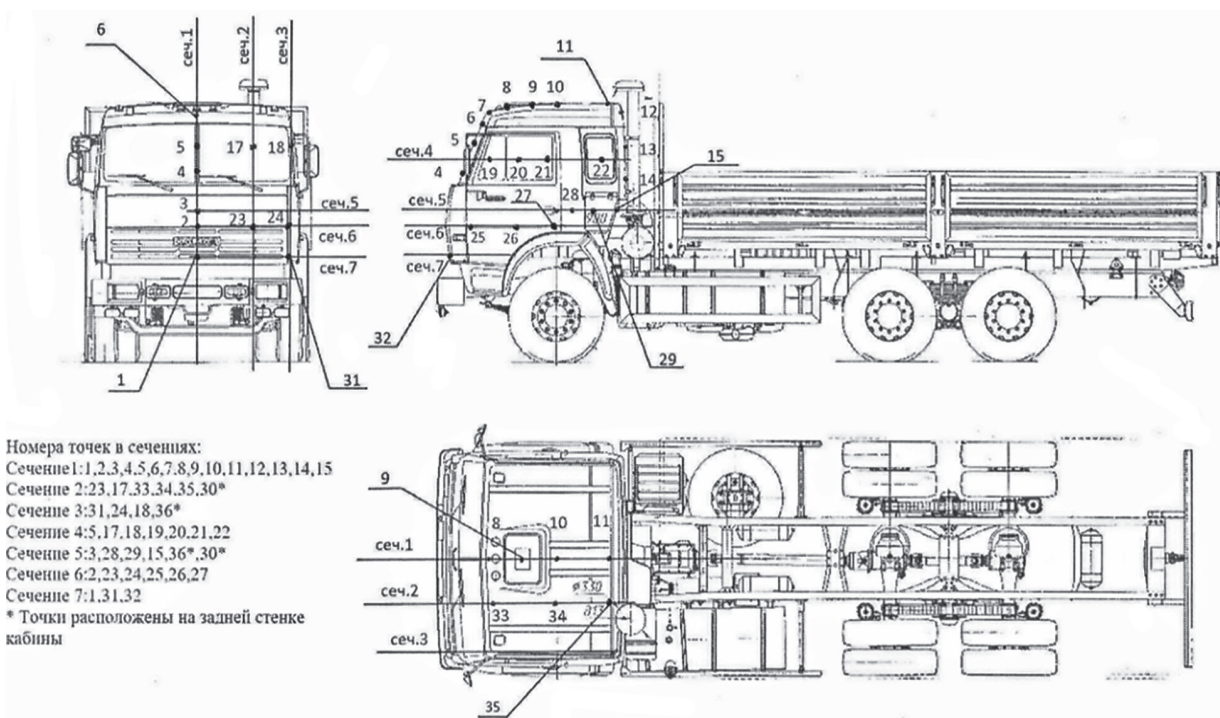


Рисунок 12 — Схема расположения контрольных точек и сечений
Figure 12 — Layout of control points and cross sections

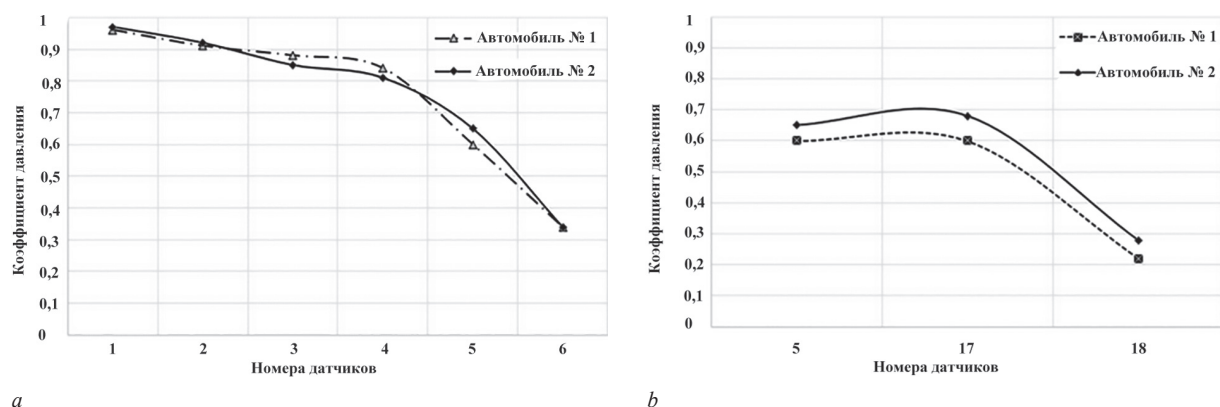


Рисунок 13 — Распределение коэффициента давления: *a* — в центральном вертикальном сечении № 1;
b — в горизонтальном сечении № 4 на уровне переднего стекла

Figure 13 — Pressure coefficient distribution: *a* — in the central vertical section no. 1;
b — in the horizontal section no. 4 at the level of the wind shield

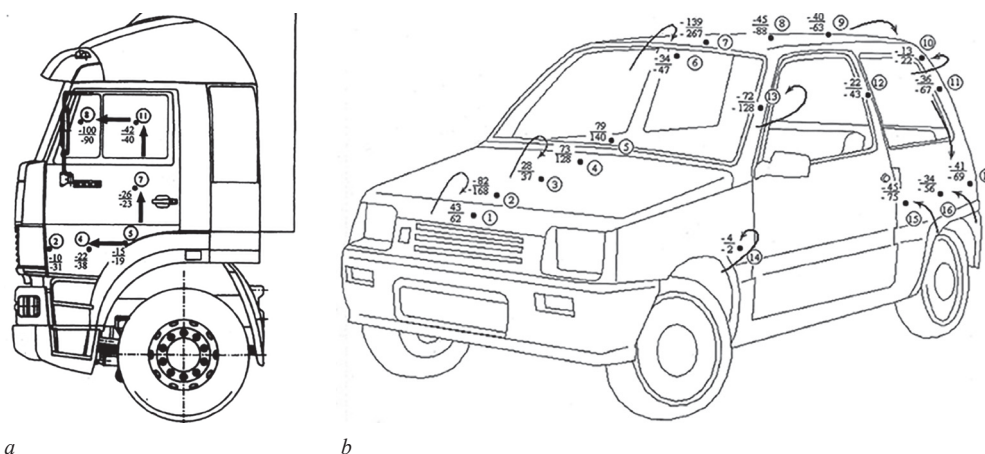


Рисунок 14 — Распределение давления по поверхностям различных КТС: *a* — распределение давления на боковой поверхности кабины грузового автомобиля; *b* — распределение давления на поверхности кузова легкового автомобиля

Figure 14 — Pressure distribution over the surfaces of various WV: *a* — pressure distribution on the side surface of the truck cabin;
b — pressure distribution on the surface of the passenger car body

которые способны переносить вверх капли грязи и воды определенных размеров. Обозначенные стрелками направления потоков на рисунке 14 *b* позволяют выделить зоны отрыва и повторно-го присоединения потока, а численные значения давления на поверхностях — определить области повышенного давления и разрежения. Эта информация важна для конструктора кузова — на ее основе он может выбрать места для забора и выпуска воздуха в системе вентиляции и отопления салона.

Заключение. Уменьшение аэродинамического сопротивления — один из резервов экономии топлива, затраты на которое достигают 25–30 % в жизненном цикле магистрального автопоезда. Расчеты показывают, что при снижении коэффициента аэродинамического сопротивления C_x на 10 % и пробеге каждого из 100 тыс. автопоездов 100 тыс. км/год можно получить экономию топлива порядка 7 млрд рос. руб. при цене топлива 70 рос. руб./л.

Показано, что в отечественной и мировой практике разработаны и применяются как качественные, так и количественные методы экспериментальных исследований. Они применимы при использовании натурных объектов и их уменьшенных моделей.

Для исследований основных аэродинамических характеристик КТС в арсенале зарубежных специалистов по аэродинамике и дизайнеров, определяющих стилевые решения с учетом законодательных и технологических ограничений, имеются высокоскоростные аэродинамические трубы для полноразмерных транспортных средств. В отечественной практике таких сооружений нет.

По этой причине автопроизводители большегрузных автомобилей вынуждены проводить натурные испытания в дорожных условиях, что нерационально с точки зрения внесения изменений в конструкцию, например, уже поставленной на производство кабины. В этих условиях эффективными оказываются внешние аэродинамические устройства, которые позволяют экономить до 6,0–7,0 %.

Результаты исследований в аэродинамической трубе показывают увеличение C_x до 30 % при изменении угла натекания α от 0 до 15°, причем зависимость близка к квадратичной. Этот факт необходимо обязательно учитывать при выполнении расчетов расхода топлива на эксплуатационных маршрутах путем увеличения C_x на 5,0–6,0 % относительно данных, полученных при нулевом угле натекания.

Полученные формулы для расчета суммарной мощности сопротивления N_B в режиме выбега автомобилей-самосвалов КАМАЗ с различной колесной формулой и шинами различных производителей и магистральных автопоездов семейств К2 и К3 позволяют определить раздельно со-

ставляющие силового и мощностного балансов, в том числе и коэффициент аэродинамического сопротивления C_x . Кроме того, они могут использоваться в учебном процессе в высших учебных заведениях.

Распределение давления по боковой поверхности кабины грузового и кузова легкового автомобилей указывает на наличие восходящих от колесных ниш потоков воздуха, которые способны переносить вверх капли грязи и воды определенных размеров и загрязнять соответствующие поверхности.

Численные значения давления на поверхностях позволяют выявить области повышенного давления и разрежения. На основе этих данных конструктор кузова может выбрать места для забора и выпуска воздуха в системе вентиляции и отопления салона, а также решить другие вопросы.

Требуется дальнейшего развития и обновления нормативная и методическая база в части как экспериментальных исследований, так и расчетно-теоретических.

Технологические тренды современности — цифровизация, роботизация, искусственный интеллект направлены на сокращение сроков разработки и доводки конструкции КТС, в том числе и в части оптимизации аэродинамических характеристик. Ключ к этому известен — компьютерное моделирование на основе валидированных методик, моделей, корректных исходных данных, высокопроизводительного программного обеспечения, в том числе и отечественного. Данная тема будет раскрыта в следующей работе автора.

Список литературы:

1. Confidence report on trailer aerodynamic devices / ed. T. Lee // North American Council for Freight Efficiency. — 2020. — 106 p. — URL: <https://nacfe.org/wp-content/uploads/2020/09/FullAeroTrailerConfidenceReport2020.pdf> (date of access: 15.05.2025).
2. Leslie, A. An analysis of the operational costs of trucking: 2025 update / A. Leslie, M. Dan // American Transportation Research Institute. — 2025. — 67 p. — URL: <https://truckinresearch.org/wp-content/uploads/2025/07/ATRI-Operational-Costs-of-Trucking-07-2025.pdf> (date of access: 15.05.2025).
3. Salaria, K. Aerodynamic integration produces a vehicle shape with a negative drag coefficient / K. Salaria, J.M. Ortega // PNAS. — 2021. — Vol. 118, no. 27. — DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2106406118>.
4. Schuetz, T.C. Aerodynamics of road vehicles / T.C. Schuetz. — 5th ed. — Warrendale: SAE International. 2016. — 1310 p.
5. Ragatz, A. Aerodynamic drag reduction technologies testing of heavy-duty vocational vehicles and a dry van trailer: technical report NREL/TP-5400-64610 / A. Ragatz, M. Thornton // National Renewable Energy Laboratory. — 2016. — 59 p. — URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy17osti/64610.pdf> (date of access: 15.05.2025).
6. Combined aero and underhood thermal analysis for heavy duty trucks: final CRADA report ANL/NE-C1201001 / ed.: P. Vegendla, T. Sofu // Argonne National Laboratory. — 2017. — 119 p. — URL: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/02/133609.pdf> (date of access: 15.05.2025).
7. Fuel consumption comparison of heavy-duty commercial vehicles under CHTC and C-WTVC cycles based on VECTO / L. Wu, X. Wang, X. Jing [et al.] // E3S Web of Conferences. — 2022. — Vol. 360. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202236001009>.

8. Comparison of on-road and wind-tunnel tests for tractor-trailer aerodynamic devices, and fuel savings predictions: SAE Technical Paper 850286 / J.W. Saunders, S. Watkins, P.H. Hoffmann, F.T. Buckley // SAE Mobilus. — 1985. — DOI: <https://doi.org/10.4271/850286>.
9. The aerodynamic characteristics of road vehicles overtaking on bridge deck under crosswinds / 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>.
10. Аэродинамика автомобиля: сб. ст. / пер. с англ. Ф.Н. Шклярчука; под ред. Э.И. Григолюка. — М.: Машиностроение, 1984. — 376 с.
11. Аэродинамика автомобиля / пер. с нем. Н.А. Юниковой; под ред. В.Г. Гухо, С.П. Загородникова. — М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.
12. Евграфов, А.Н. Аэродинамика магистральных автопоездов / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий, А.И. Титович. — Минск: Наука и техника, 1988. — 232 с.
13. Евграфов, А.Н. Аэродинамика колесного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий. — Минск: Белавтотракторостроение, 2001. — 368 с.
14. Влияние заднего спойлера полуприцепа на общее аэродинамическое сопротивление седельного автопоезда / А.Ф. Андрейчик, В.И. Ивченко, В.С. Короткий [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 2(27). — С. 30–33.
15. Михайловский, Е.В. Аэродинамика автомобиля / Е.В. Михайловский. — М.: Машиностроение, 1973. — 224 с.
16. Бендерский, Б.Я. Аэродинамика наземных транспортных средств. Курс лекций: учеб. пособие / Б.Я. Бендерский. — Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2017. — 304 с.
17. Козлов, А.В. Современные тенденции в оценке топливной экономичности автомобилей большой грузоподъемности / А.В. Козлов, А.С. Теренченко // Труды НАМИ. — 2025. — № 3(302). — С. 96–114.
18. Валеев, Д.Х. Эволюция аэродинамических характеристик автомобилей «КАМАЗ» / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев // Известия МГТУ МАМИ. — 2014. — Т. 8, № 1–1. — С. 13–19.
19. Пути развития сотрудничества КАМАЗА и НАМИ в области испытаний грузовых автомобилей и автопоездов способом выбега / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев, С.В. Бахмутов, В.А. Петрушов // Журнал автомобильных инженеров. — 2014. — № 5(88). — С. 28–33.
20. Петрушов, В.А. Автомобили и автопоезда: новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха: 90-летию НАМИ посвящается / В.А. Петрушов. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. — 352 с.
21. Карабцев, В.С. Методика определения коэффициентов аэродинамического сопротивления и с сопротивлением качению шин автопоезда методом выбега / В.С. Карабцев // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — № 3(68). — С. 21–27. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-21-27>.

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 October 13, 2025.

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

Aerodynamics have an impact on many consumer properties of vehicles and their components — fuel consumption, appearance, dynamics, vehicle steerability, comfort of the driver and passengers, and safety. Therefore, developers spend huge amounts of money on blowing full-scale samples and scale models in wind tunnels and conducting laboratory and road tests on landfill roads. Numerical modeling using powerful computers is becoming increasingly widespread, aimed at fine-tuning the shape of vehicle cabins and external aerodynamic devices at the early stages of design. The article provides an overview of experimental research methods for the aerodynamic characteristics of vehicles and their components and the obtained research results.

Keywords: wheeled vehicle, aerodynamic characteristics, research methods, testing of full-scale samples and models, coefficient of aerodynamic resistance, run-out, pressure distribution

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-31-42>

References

1. Confidence report on trailer aerodynamic devices. 2020. 106 p. Available at: <https://nacfe.org/wp-content/uploads/2020/09/FulIAeroTrailerConfidenceReport2020.pdf> (accessed May 15, 2025).
2. Leslie A., Dan M. An analysis of the operational costs of trucking: 2025 update. 2025. 67 p. Available at: <https://truckingresearch.org/wp-content/uploads/2025/07/ATRI-Operational-Costs-of-Trucking-07-2025.pdf> (accessed May 15, 2025).
3. Salaria K., Ortega J.M. Aerodynamic integration produces a vehicle shape with a negative drag coefficient. *PNAS*, 2021, vol. 118, no. 27. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2106406118>.

4. Schuetz T.C. *Aerodynamics of road vehicles*. Warrendale, SAE International, 2016. 1310 p.
5. Ragatz A., Thornton M. *Aerodynamic drag reduction technologies testing of heavy-duty vocational vehicles and a dry van trailer*. Technical report, no. NREL/TP-5400-64610, 2016. 59 p. Available at: <https://docs.nrel.gov/docs/fy17osti/64610.pdf> (accessed May 15, 2025).
6. Vegendla P., Sofu T. *Combined aero and underhood thermal analysis for heavy duty trucks*. Final CRADA report, no. ANL/NE-C1201001, 2017. 119 p. Available at: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/02/133609.pdf> (accessed May 15, 2025).
7. Wu L., et al. Fuel consumption comparison of heavy-duty commercial vehicles under CHTC and C-WTVC cycles based on VECTO. *E3S web of conferences*, 2022, vol. 360. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236001009>.
8. Saunders J.W., Watkins S., Hoffmann P.H., Buckley F.T. *Comparison of on-road and wind-tunnel tests for tractor-trailer aerodynamic devices, and fuel savings predictions*. SAE technical paper, no. 850286, 1985. DOI: <https://doi.org/10.4271/850286>.
9. Chen N., Sun H., Wang X., Zhang L. The aerodynamic characteristics of road vehicles overtaking on bridge deck under crosswinds. *Advances in civil engineering*, 2020, vol. 2020, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8847219>.
10. *Automotive aerodynamics*. Warrendale, Society of Automotive Engineers, 1978.
11. Hucho W.-H. *Aerodynamik des Automobils*. Würzburg, Vogel-Verlag, 1981.
12. Evgrafov A.N., Vysotskiy M.S., Titovich A.I. *Aerodinamika magistralnykh avtopoezdov* [Aerodynamics of mainline road trains]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 232 p. (in Russ.).
13. Evgrafov A.N., Vysotskiy M.S. *Aerodinamika kolesnogo transporta* [Aerodynamics of wheeled transport]. Minsk, Belavtotraktorostroenie Publ., 2001. 368 p. (in Russ.).
14. Andreichyk A.F., et al. Vliyanie zadnego spoylera polupritsepa na obshchee aerodinamicheskoe soprotivleniye sedelnogo avtopoezda [The influence of a rear deflector of a semitrailer on aerodynamics of an articulated truck]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2014, no. 2(27), pp. 30–33 (in Russ.).
15. Mikhaylovskiy E.V. *Aerodinamika avtomobilya* [Car aerodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 224 p. (in Russ.).
16. Benderskiy B.Ya. *Aerodinamika nazemnykh transportnykh sredstv. Kurs lektsiy* [Aerodynamics of land vehicles. Course of lectures]. Izhevsk, Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet imeni M.T. Kalashnikova Publ., 2017. 304 p. (in Russ.).
17. Kozlov A.V., Terenchenko A.S. Sovremennye tendentsii v otsenke toplivnoy ekonomichnosti avtomobiley bolshoy gruzopodemnosti [Current trends in assessing fuel economy of heavy duty vehicles]. *Trudy NAMI*, 2025, no. 3(302), pp. 96–114 (in Russ.).
18. Valeev D.H., Karabtsev V.S. Evolyutsiya aerodinamicheskikh kharakteristik avtomobiley "KAMAZ" [The evolution of aerodynamic characteristics of KAMAZ automobiles]. *Izvestia MGTU MAMI*, 2014, vol. 8, no. 1–1, pp. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67659> (in Russ.).
19. Valeev D.Kh., Karabtsev V.S., Bakhmutov S.V., Petrushov V.A. Puti razvitiya sotrudnichestva KAMAZA i NAMI v oblasti ispytaniy gruzovykh avtomobiley i avtopoezdov sposobom vybega [Ways to develop cooperation between KAMAZ and NAMI in the field of testing trucks and road trains by the run-out method]. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2014, no. 5(88), pp. 28–33 (in Russ.).
20. Petrushov V.A. *Avtomobili i avtopoezda: novye tekhnologii issledovaniya soprotivleniy kacheniya i vozdukh: 90-letiyu NAMI posvyashchaetsya* [Cars and road trains: new technologies for the study of rolling and air resistance: dedicated to the 90th anniversary of NAMI]. Moscow, TORUS PRESS Publ., 2008. 352 p. (in Russ.).
21. Karabtsev V.S. Metodika opredeleniya koeffitsientov aerodinamicheskogo soprotivleniya i s soprotivleniya kacheniyu shin avtopoezda metodom vybega [Methodology for determining the coefficients of aerodynamic drag and rolling resistance of road train tires in coasting mode]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 3(68), pp. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-21-27> (in Russ.).