



# ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УДК 536.46

В.С. КАРАБЦЕВ, Д.Х. ВАЛЕЕВ, кандидаты техн. наук  
Камский автомобильный завод, г. Набережные Челны, Россия

## АЭРОДИНАМИКА ПЛОХООБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

*Представлен обзор исследований в области аэродинамики плохообтекаемых тел и некоторые полезные модели течений, применяемые в теоретических исследованиях аэродинамики самолета. Показаны возможности и резервы повышения потребительских свойств автомобилей за счет улучшенной аэродинамики. Продемонстрированы отдельные результаты работ, выполненных на КАМАЗе. Данный обзор выполнен с использованием опубликованных в открытой печати материалов и ни в коей мере не претендует на полноту изложения.*

**Ключевые слова:** аэродинамика, проектирование, грузовые автомобили, аэродинамические характеристики, аэродинамические устройства

Одним из основных путей повышения потребительских качеств, в том числе и топливной экономичности грузовых автотранспортных средств, является улучшение их аэродинамических характеристик. В первую очередь — снижение аэродинамического сопротивления, механизм формирования которого ввиду его сложности применительно к грузовикам изучен пока не достаточно. Связано это с тем, что практические соображения по выполнению требований сертификации по безопасности, эргономики и технологии изготовления зачастую определяют выбор такой формы транспортного средства, обтекание которой встречным потоком воздуха сопровождается его трехмерным отрывом с острых кромок кабины, кузова (фургона), прицепа или полуприцепа.

Для снижения аэродинамического сопротивления в конструкциях грузовых автомобилей находят широкое применение навесные аэродинамические устройства. Это, в первую очередь, различные обтекатели, 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. Над верхней кромкой ветрового стекла устанавливаются противосолнечные аэродинамические козырьки. Под бампером — металлические или пластиковые спойлеры, назначение которых — упорядочить воздушный поток под днищем автомобиля. Гораздо меньшее распрост-

ранение получили обтекатели стоек ветрового стекла, щеток стеклоочистителей, зеркал, различные дефлекторы и т.д.

Известно, что внешняя аэродинамика находится в тесной взаимосвязи с внутренней и оказывает существенное влияние и на другие показатели и характеристики автомобиля в целом и его отдельные системы. Среди таких показателей и систем следует указать:

- динамические характеристики, особенно при сильном боковом ветре;
- самозабрызгиваемость, накопление пыли, грязи и снега в застойных зонах;
- акустический комфорт в кабине и уровни внешнего и внутреннего шума (как следствие генерации звука внешними аэродинамическими устройствами и навесными элементами);
- система питания двигателя воздухом;
- системы вентиляции, отопления и поддержания микроклимата в кабине;
- система охлаждения двигателя;
- температурный режим тормозных механизмов, особенно в условиях горной местности и некоторые другие системы, от которых зависит производительность автомобиля, безопасность движения и утомляемость водителя.

Ведущие автомобилестроительные фирмы затрачивают огромные средства на продувки натурных образцов и масштабных моделей в аэродинамических трубах, численное моделирование с применением мощных компьютеров и доводку формы кабин автомобилей и внешних аэродинамических устройств при

проведении лабораторно-дорожных испытаний. Все это делается потому, что стилиевые и дизайнерские решения не всегда являются правильными в плане обеспечения эффективности и функциональности тех или иных элементов и систем.

Грузовой автомобиль представляет собой трехмерную конфигурацию и относится к классу плохообтекаемых тел в отличие от самолета или его элементов. Если вопросами улучшения аэродинамических характеристик легковых автомобилей, спортивных (гоночных) автомобилей и автобусов разработчики начали заниматься еще в 20...30 годы прошлого века, то исследованием аэродинамики грузовых автомобилей они всерьез занимаются только с конца 60-х годов. Следствием этого являются:

- поверхностное изучение механизма образования аэродинамического сопротивления и его составляющих;
- недостаточное понимание физических процессов и явлений при возникновении отрывных и обратных течений, особенно при трехмерном отрыве;
- отсутствие систематических исследований характеристик внутренних течений в моторном отсеке, колесных нишах и в кабине.

Более серьезные исследования по оценке распределения давления и изучению структуры потока выполнены в аэродинамических трубах на простейших трехмерных геометрических телах — параллелепипедах. Попытаемся проанализировать некоторые результаты исследований в аэродинамических трубах с целью их практического применения при разработке формы кабины перспективных автомобилей.

В работе [1] исследуется (рисунок 1) влияние радиуса закругления фронтальных кромок прямоугольного параллелепипеда размерами 0,2×0,2×1,0 м на распределение давления  $C_p$  в его центральном сечении при числе Рейнольдса  $Re_c = 2,6 \times 10^5$  и на коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$ .

Полученные данные свидетельствуют о том, что скругление фронтальных кромок параллелепипеда от  $r/h=0$  до  $r/h=0,2$  (где  $r$  — радиус закругления,  $h$  — ширина/высота тела) приводит к существенному перераспределению давления на фронтальной и боковой поверхностях тела и к уменьшению величины  $C_D$  от 0,794 до 0,170 — в 4,67 раза! Изменения донного давления при этом не установлено.

В ходе дальнейших исследований вместо закругления фронтальных кромок оценивалось влияние геомет-

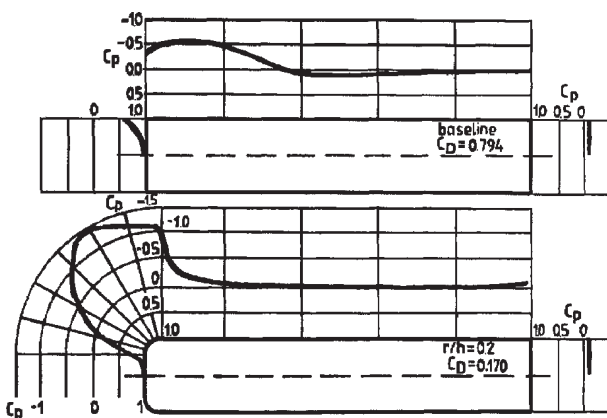


Рисунок 1 — Распределение давления ( $C_p$ ) в плоскости симметрии прямоугольного параллелепипеда (поток направлен слева направо)

рии ступенчатой формы передней части тела и влияние направляющих планок различных размеров.

Несколько направляющих планок крепятся к передней стенке тела и таким образом образуют углубление со стороны набегающего потока.

Результаты исследований по определению влияния геометрических параметров ступенчатой формы на коэффициент  $C_p$  и характер течения в лобовой части тела приведены на рисунке 2.

Из данных рисунка 2 а видно, что при соотношении геометрических параметров  $b/h = 0,8$  и  $m/h = 0,3$  ( $m$  — длина ступеньки, которую можно трактовать как длину кабины,  $b$  — ширина ступеньки, которую можно рассматривать как ширину или высоту кабины,  $h$  — высота параллелепипеда) величина  $C_D$  уменьшается до 0,33 против  $C_D = 0,79$  в исходном состоянии. Информация, представленная на рисунках 2 в и 2 с, указывает на существование минимума коэффициента  $C_D$  при условии обеспечения присоединения потока, оторвавшегося с нижней ступеньки строго на верхнюю.

На рисунке 3 отражено влияние геометрических размеров планок на величины коэффициентов  $C_D$  и  $C_p$ . Видно, что оптимальное сочетание параметров ( $m/h = 0,15$  и  $b/h = 0,82$ ) обеспечивает такой характер течения, который приводит к уменьшению размеров области разрежения на боковых поверхностях и величины  $C_D$  до 0,344. При этом отмечается весьма существенная чувствительность потока к геометрическим параметрам.

Даже при незначительном отклонении параметров от оптимальных отмечается резкий рост величины  $C_D$ . Следует отметить, что протяженность области разрежения на боковой поверхности в направлении потока определяет аэродинамическое сопротивление, так как в этой области располагаются зоны обратного течения. Последнее утверждение справедливо и при оценке аэродинамических характеристик более сложных трехмерных тел, в том числе и автомобилей.

На рисунках 4 а и 4 б приводятся результаты исследований по уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$  прямоугольного параллелепипеда в зависимости от количества и расположения уступов и накладных элементов как в присутствии неподвижного экрана, так и без него. Показано, что оптимизацией геометрических параметров ступенчатой формы можно достичь уменьшения величины  $C_D$  на 46...48 %, а при использовании планок — на 36...42 % при испытаниях в аэродинамической трубе с неподвижным экраном.

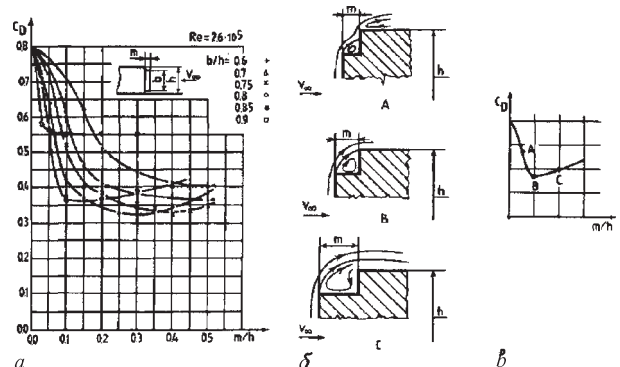


Рисунок 2 — Определение влияния геометрических параметров ступенчатой формы на коэффициент  $C_p$ ; а — изменение  $C_D$  в зависимости от геометрии параллелепипеда; б — структура потока при обтекании ступенчатой формы; в — существование минимума сопротивления

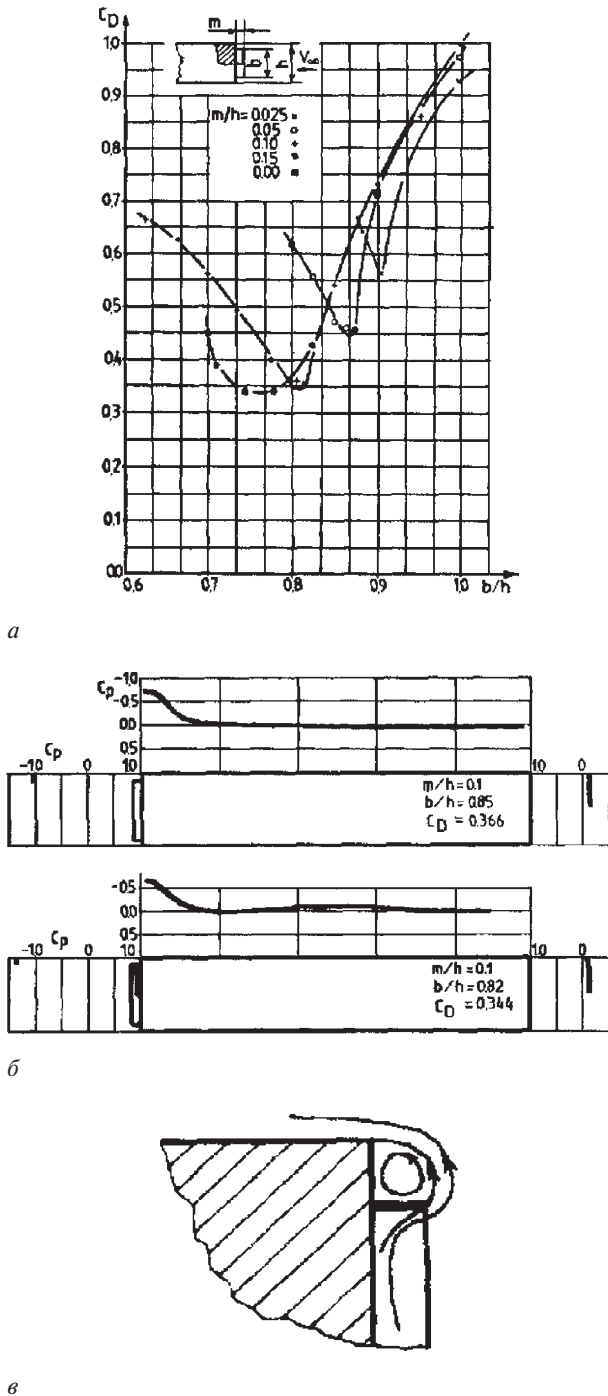


Рисунок 3 — Влияние геометрических размеров планок на величины коэффициентов  $C_D$  и  $C_p$ ; а — изменение коэффициента  $C_D$  в зависимости от геометрических параметров направляющих планок; б — влияние направляющих планок на коэффициент  $C_p$ ; в — структура течения при обтекании выемки

Большой объем исследований по аэродинамике плохобтекаемых тел выполнен в аэродинамической трубе Т-1К Казанского авиационного института (ныне КГТУ — КАИ им. А.Н. Туполева) группой специалистов под руководством А.К. Ватолина. В частности, была выполнена оценка влияния размеров и расположения экранирующей пластины, устанавливаемой перед фронтальной поверхностью прямоугольного параллелепипеда, на коэффициент его аэродинамического сопротивления  $C_x$  и распределение коэффициента давления  $C_p$ . Отметим, что

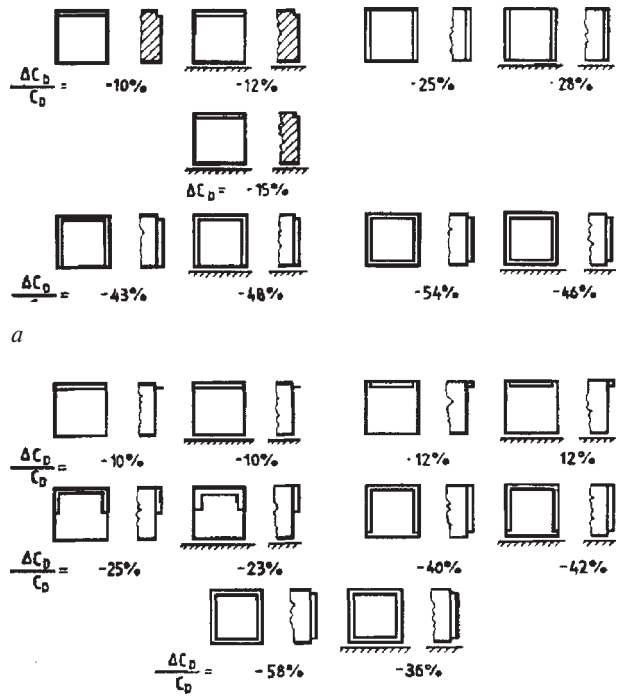


Рисунок 4 — Результаты исследований по уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$  прямоугольного параллелепипеда: а — влияние ступенчатой формы передней части параллелепипеда на уменьшение коэффициента сопротивления  $C_D$ ; б — влияние направляющих планок на уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления

коэффициент аэродинамического сопротивления в работах зарубежных исследователей обозначается  $C_D$ , в работах отечественных —  $C_x$ .

Из результатов исследований, приведенных на рисунке 5 видно, что установка экрана перед параллелепипедом приводит к уменьшению величины  $C_x$  от 0,82 до 0,33 (в 2,48 раза!) и существенному перераспределению давления.

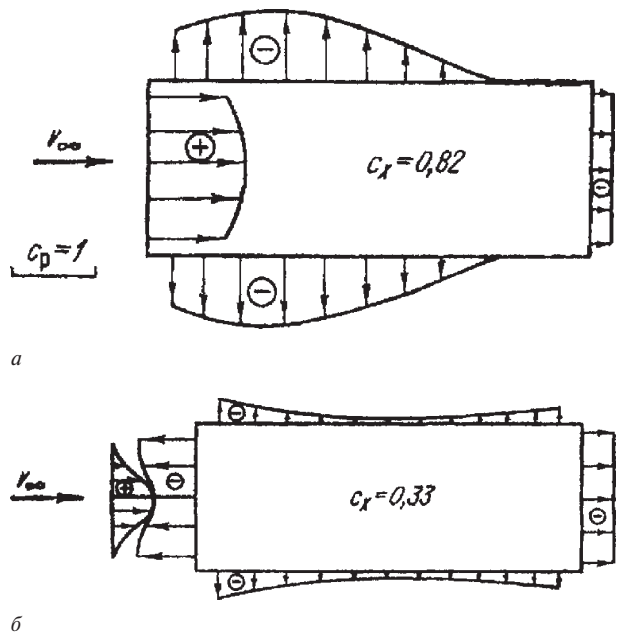


Рисунок 5 — Распределение давлений по поверхности параллелепипеда: а — без экранирующей пластины; б — с экранирующей пластиной

Фронтальная поверхность параллелепипеда, находящаяся без экрана в зоне избыточного давления, при наличии экрана, оказывается в зоне разрежения и сопротивление системы «экран + тело» резко падает. Первое тело (пластина) как бы подтягивает, увлекает за собой второе тело.

О влиянии близости дороги, формы передней и задней части пространственных и осесимметричных тел содержится информация в работе [2].

Исследованиям аэродинамических характеристик грузовых автомобилей посвящены работы [3] и [4] А.Н. Евграфова и М.С. Высоцкого, В.А. Петрушова [5] и [6]. Влияние ряда широко распространенных навесных аэродинамических устройств на уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления прицепа и седельного автопоезда на основании работы [4] отражено на рисунке 6.

Некоторые полезные представления относительно характера отрывных течений в трехмерной постановке можно получить из области аэродинамики самолета. Так, в частности, структура течений у поверхности с отрывными областями рассмотрена в работе [7]. Два типичных случая отрыва потока от поверхности тела показаны на рисунках 7 и 8. На первом из указанных рисунков представлен случай течения с образованием так называемого пузыря. В этом случае между поверхностью тела и поверхностью пузыря заключена масса воздуха, переносимая (движущаяся) вместе с телом.

Во втором случае формируется свободный сдвиговый слой или вихревая поверхность. Пространство по обе стороны поверхности отрыва полностью заполнено жид-

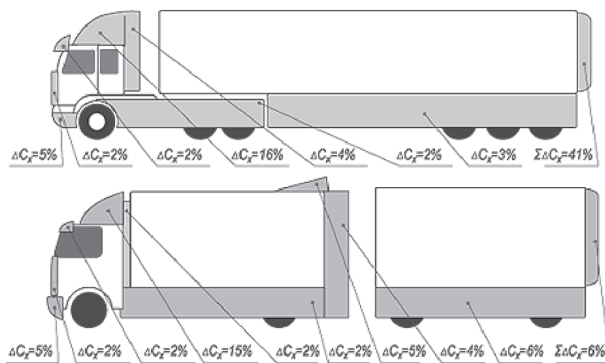


Рисунок 6 — Влияние аэродинамических устройств на коэффициент  $C_x$

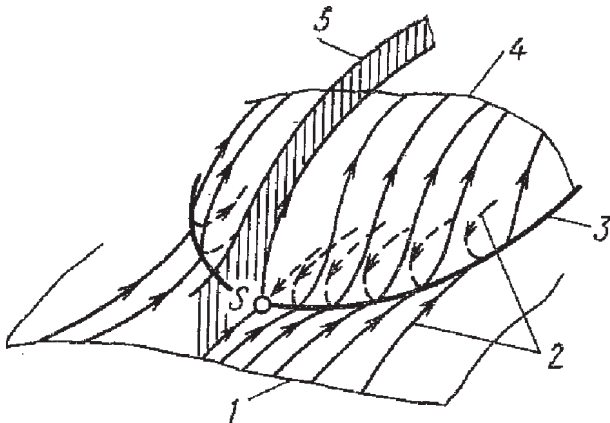


Рисунок 7 — Отрыв в трехмерном течении с образованием области отрыва («пузыря») и особой точки отрыва: 1 — поверхность твердого тела; 2 — предельные линии тока на поверхности; 3 — линия отрыва; 4 — поверхность отрыва; 5 — вязкая область во внешнем течении

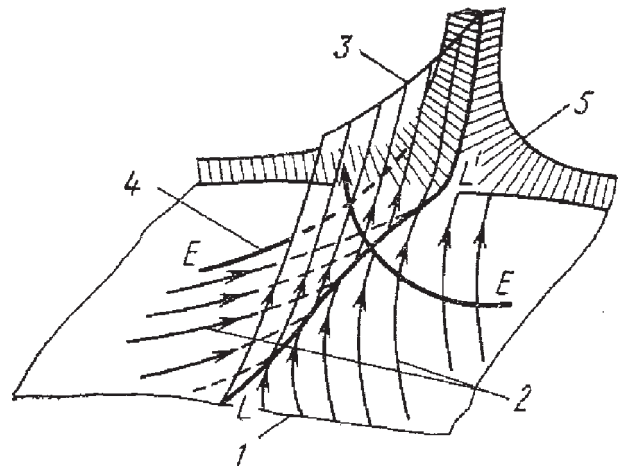


Рисунок 8 — Обычный отрыв в трехмерном течении с образованием вихревой поверхности: 1 — поверхность твердого тела; 2 — предельные линии тока на поверхности тела; 3 — поверхность отрыва; 4 — линия тока внешнего течения; 5 — вязкая область

костью основного потока. На рисунках показаны предельные линии тока на поверхностях, а также тенденции их приближения к линии отрыва в виде обратной «елочки» с образованием поверхности отрыва.

Приведенные примеры демонстрируют, что те представления, которые основываются на двумерной теории отрыва пограничного слоя, в которых линии отрыва должны быть перпендикулярны направлению основного потока, оказываются малоинформативными в случае трехмерных отрывных течений.

**Выводы по аналитическому обзору.** 1. Резкое уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления прямоугольного параллелепипеда происходит при условии обеспечения радиуса скругления фронтальных кромок составляющего величину порядка 20 % от ширины параллелепипеда.

2. Минимум аэродинамического сопротивления ступенчатых трехмерных конфигураций реализуется при условии присоединения оторвавшегося с нижней ступеньки потока строго на верхнюю.

3. Оптимизацией геометрических параметров ступенчатой формы тела достигается уменьшение величины коэффициента аэродинамического сопротивления на 46...48 %, с использованием накладных планок — на 36...42 % при испытаниях в аэродинамической трубе с неподвижным экраном.

4. Установка перед параллелепипедом экранирующей пластины, при оптимальном соотношении площадей пластины и передней грани параллелепипеда и при оптимальном расстоянии между ними, позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление системы «экран + тело» в 2,5 раза!

5. Возможный предел уменьшения силы лобового сопротивления современного магистрального автопоезда оценивается величиной 40...50 %.

**Практическая реализация и перспективы.** Полученные результаты аналитических исследований нашли свое применение в практике проектирования грузовых автомобилей. В каждом конкретном случае полученные данные подвергались дополнительному анализу. В целом, на КАМАЗе выполнен значительный объем конструкторских работ и дорожных испытаний и исследований [8],



[9], [10] с целью изучения механизма формирования и снижения аэродинамического сопротивления.

К сожалению, до сих пор эти работы не нашли практической реализации в производстве. Причинами тому являются: переоценка конструкторских возможностей при разработке аэродинамических устройств из-за отсутствия достоверных расчетных методов оценки их эффективности и оптимизации конструкции, несовершенство методологического обеспечения дорожных испытаний, слабая сходимости результатов исследований моделей в аэродинамической трубе и испытаний натурных образцов в дорожных условиях.

Отсутствие производства аэродинамических устройств на заводе способствовало появлению различных малых и средних частных предприятий по их изготовлению, реализации и установке. Слов нет, дело это нужное, поскольку уменьшение потребления нефтяного топлива автоматически приводит к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу с выхлопными газами.

Отметим, что исследования проводились на самых различных автомобилях как по назначению — бортовых, седельных, самосвалах, так и по комплектации — автомобили с тентом грузовой платформы и без него, с грузом и без и т.д. В данной работе мы ограничимся анализом методик исследований бортовых автомобилей типа КАМАЗ-53215 (рисунок 9) и их модификаций типа седельных тягачей КАМАЗ-54115. Законы аэродинамики носят общий характер и со временем они не меняются.

Испытания, как правило, включали два этапа. На первом выполнялась оптимизация конструкции аэродинамического устройства (размеров, формы, радиусов кривизны поверхности и т.д.) и выбор места его установки. Проводилось это как методом визуализации воздушного потока с помощью так называемых «шелковинок» (рисунок 10), наклеиваемых на поверхность кабины и кузова, так и по распределению давления на поверхностях автомобиля, регистрируемых с помощью специальных датчиков.



Рисунок 9 — Верхний обтекатель на крыше кабины

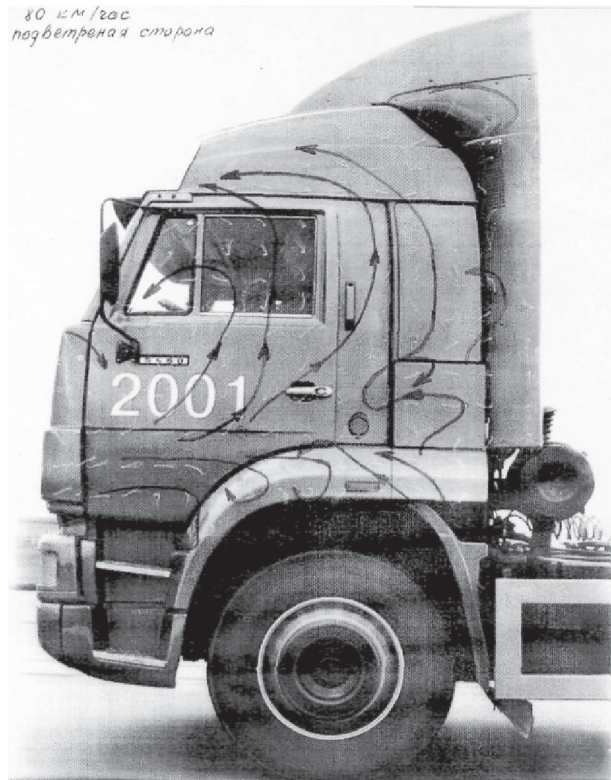


Рисунок 10 — Визуализация потока

Первый метод является качественным, так как «шелковинки» показывают только направление потока. Порой даже такой информации для специалистов оказывается достаточно для принятия решения о целесообразности применения устройства. Второй, являясь количественным, позволяет по перепадам давления в двух точках поверхности оценивать силовое воздействие потока воздуха и определять его скорость, которая связана функциональной зависимостью с давлением на поверхности тела.

На втором этапе проводилась окончательная оценка эффективности различных устройств и их сочетаний (совместной установки) в топливном выражении. Для этого фиксировались расходы топлива при заданной постоянной скорости движения или на заданном маршруте. Сначала — для автомобиля с устройствами, а затем — без них. Во избежание отрицательного влияния изменения погодных условий заезды проводились в один день. Для измерения и регистрации расхода топлива использовались высокоточные расходомеры, погрешность которых не превышала 0,3 %.

В целом выполненные исследования показали, что эффективность испытанных конструкций аэродинамических устройств с точки зрения их практического применения в конструкциях автомобилей имеет резервы повышения.

Тем не менее, было установлено, что использование испытанных конструкций аэродинамических противосолнечных козырьков на автомобилях КАМАЗ с тентом и самосвалах приводит к увеличению расхода топлива на 1...3 %. На автомобилях без тента грузовой платформы установка аэродинамических козырьков с оптимизированными геометрическими параметрами, наоборот, позволяет уменьшить расход топлива до 2,5 %.

На автомобилях с грузовой платформой без тента полезна установка устройств типа козырька, который еще и защищает водителя от ослепления солнечными

лучами. В этом случае, однако, бесполезен или даже вреден обтекатель на крыше кабины.

Автомобили, оборудованные тентом платформы или фургоном должны комплектоваться обтекателями и козырьками, при условии организации направленного потока через проходное сечение козырька в пространство между обтекателем крыши и передней стенкой фургона.

Если превышение фургона относительно крыши кабины составляет величину до 500...600 мм, то можно использовать простые в изготовлении щитовые обтекатели. Для более высоких фургонов целесообразна установка объемных и, естественно, более дорогих и материалоемких обтекателей.

Спойлеры могут устанавливаться на все автомобили, за исключением тех, предназначение которых — покорять бездорожье. А вот боковые обтекатели ограниченный по применению не имеют. В процессе эксплуатации за ними уход небольшой — не допускать их деформации, утери и смятия.

Боковины кабины, будучи не эффективными на бортовых автомобилях, оказываются весьма полезными в конструкциях седельных тягачей. На основе приведенного материала были выработаны и другие рекомендации, в том числе и по совместной установке устройств. Последнее замечание: эффективность «аэродинамической доводки» тем выше, чем хуже обтекаемость исходной конструкции [11], [12]. Справедливость данного утверждения подтверждена не только в лабораторных условиях, но и в реальной эксплуатации.

И в заключение несколько иллюстраций о возможностях аэродинамического «тюнинга» автомобилей будущего (рисунок 11). Фотография на рисунке 11 а заимствована из журнала CommercialMotor (№ 6, 2011, стр. 33), а на рисунке 11 б — из сайта vda-design-award.de.

#### Список литературы

1. TamasLajos. Dragreductionbytheproduction of a separation bubble on the front of bluff body // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. — 1986. — № 22. — pp. 331—338.
2. Бирман, Э.Т. Обзор. Течения вблизи плохообтекаемых тел, применимые к аэродинамике автомашин / Э.Т. Бирман // Теоретические основы инженерных расчетов. — 1980. — Т. 102; № 3. — С. 85—96.
3. Евграфов, А.Н. Аэродинамика магистральных автопоездов / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий, А.И. Титович. — Минск: Наука и техника, 1988. — 232 с.
4. Евграфов, А.Н. Аэродинамика колесного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий. — Минск: Белавтотракторостроение, 2001. — 368 с.
5. Петрушов, В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха / В.А. Петрушов. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. — 352 с.: ил.



а



б

Рисунок 11 — Примеры решений проблем аэродинамики автомобилей будущего

6. Петрушов, В.А. Оценка аэродинамических качеств и сопротивлений качению автомобиля в дорожных условиях / В.А. Петрушов // Автомобил. пром-сть. — 1985. — № 11. — С. 14—20.
7. Кюхеман, Д. Аэродинамическое проектирование самолетов: пер. с англ. / пер. Н.А. Благовещенский, Г.И. Майкапар; под ред. Г.И. Майкапара. — М.: Машиностроение, 1983. — 656 с.
8. Карабцев, В.С. Исследование аэродинамических характеристик модернизированных автомобилей КАМАЗ в дорожных условиях / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев // Грузовик. — 2000. — № 12. — С. 25—27.
9. Карабцев В.С. Оптимизация бокового обтекателя кабины грузового автомобиля / В.С. Карабцев, Д.Х. Валеев // Автомобил. пром-сть. — 2005. — № 5. — С. 30—32.
10. Карабцев, В.С. Оценка эффективности аэродинамических устройств / В.С. Карабцев, В.П. Штулас // Автомобил. пром-ть. — 1986. — № 11. — С. 17—18.
11. Аэродинамика автомобиля / под ред. В.Г. Гухо; пер. с нем. — М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.
12. Аэродинамика автомобиля: сб. статей / пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1984. — 376 с.

Karabtsev V.S., Valeev D.H.

#### Aerodynamics of bluff bodies and the possibility of its application in the design of trucks. Analytical Review

The paper presents an overview of research in the field of aerodynamics of bluff bodies and some useful flows which are used in theoretical studies on the aerodynamics of aircraft. The possibilities and reserves of increasing consumer properties of vehicles are shown due to improved aerodynamics. Had been demonstrated some results of work carried out at KAMAZ. This review is done using the published materials and does not claim to be exhaustive.

Поступила в редакцию 11.05.2011.