

ВЕК АЭРОДИНАМИКИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

к.т.н. **Королев Е.В.**¹, к.т.н. **Жамалов Р.Р.**¹, к.т.н. **Бернацкий В.В.**²

¹Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Нижний Новгород, Россия

²Московский политехнический университет, Москва, Россия

vladislav_bern@mail.ru

В статье анализируется изменение во времени значений коэффициента C_x и аэродинамического фактора для легковых автомобилей ведущих фирм. Приводятся расчетные уравнения аэродинамических показателей как для всего массива легковых автомобилей, так и при разбивке их на классы по европейской классификации. В анализе использованы данные аэродинамических показателей основных типов кузовов легковых автомобилей, полученных как при проведении дорожных испытаний, так и при эксперименте в аэродинамических трубах с полномасштабными объектами. Приводятся примеры несоответствия аэродинамических показателей и результаты корреляционных исследований легковых автомобилей полученных в разных условиях, в разных аэродинамических трубах и сравнение с дорожными испытаниями. Указываются причины этих несоответствий. Приводятся примеры изменения аэродинамических показателей от времени выпуска поколений некоторых марок автомобилей. Указываются лучшие и худшие автомобили по аэродинамическим показателям для всех шести классов европейской классификации. Новизной является определение закономерности изменения аэродинамических показателей, в частности аэродинамического фактора, для всего периода развития автомобилизации, что требует использования большого массива данных. Также представлены результаты анализа. Результатом анализа является вывод о снижении величины аэродинамического фактора легковых автомобилей для всего времени автомобилизации с изменением внешней формы кузова.

Ключевые слова: время, изменения, автомобиль, воздушное сопротивление, коэффициент C_x , аэродинамический фактор, классы автомобилей, расчет.

Введение

Целью данной статьи является определение зависимости воздушного сопротивления легковых автомобилей от внешней формы кузова, которая является функцией времени. Это предполагает определение аэродинамических показателей автомобилей по расчетным уравнениям.

В данной статье для анализа использованы величины коэффициента лобового воздушного сопротивления C_x и аэродинамического фактора $C_x F$. Величина аэродинамического фактора $C_x F$ определяется произведением значений коэффициента воздушного сопротивления и площади поперечного сечения автомобиля. Анализу подвергались серийно выпускаемые автомобили с кузовами седан, хэтчбек, фастбек и универсал. Автомобили с открытыми и спортивными кузовами не рассматривались. На достоверность анализа влияют различные факторы: в первую очередь, величина исследуемого массива автомобилей, способ определения площади поперечного сечения, время и место проведения аэродинамического эксперимента и даже тип установленного двигателя.

Обращает на себя внимание тот факт, что для конкретного легкового автомобиля в опубликованных технических данных приводятся разные величины коэффициента лобового воздушного сопротивления.

Представление об историческом изменении аэродинамических показателей возможно получить из опубликованных немногочисленных научных статей. Но такое представление является неполным, на наш взгляд, из-за малого объема приведенного материала, малой достоверности некоторых данных. Необходимо расширить массив аэродинамических показателей автомобилей, чтобы делать выводы по всей истории автомобилизации. Например, на международной конференции автомобильных аэродинамиков в 2010 г. специалистами немецкой компании «Ауди» на основании результатов аэродинамических испытаний 20 автомобилей разных типов и классов сделан вывод о стабильности величины аэродинамического фактора. При этом в анализе участвовали автомобили разных типов и разных классов.

Методы и способы

В данной статье из имеющегося в нашем распоряжении массива аэродинамических показателей для более 7 тысяч легковых автомобилей использованы порядка 1,5 тысячи в силу указанных выше ограничений.

Каждому этапу автомобилизации соответствуют определенные концепции формообразования автомобильного кузова. Отличия автомобильных кузовов внутри каждого этапа не носят глобальный характер. Для них изменения геометрических параметров, описывающих внешнюю форму, происходит в небольших интервалах значений. Достоинством такого подхода к определению аэродинамических показателей является участие в исследовании натуральных объектов. Это является принципиальным отличием от параметрических аэродинамических испытаний автомобилей, которые, как правило, проводится с масштабными моделями. Достоверность параметрических исследований зависит от числа геометрических параметров и выбранных испытателем границ их изменения.

Основным инструментом определения аэродинамических качеств автомобилей является аэродинамическая труба (АТ) [1]. По сведениям авторов статьи, в настоящее время насчитывается более 40 полноразмерных аэродинамических труб, используемых автомобильной промышленностью. Чаще публикуются результаты исследований в аэродинамических трубах: английской MIRA, германских Volkswagen, Daimler – Benz, Porsche, французской АТ Saint – Cyr, американской Ford, итальянской FIAT.

Достоверность результатов измерений в аэродинамических трубах всегда интересовала специалистов. Постоянно проводятся тесты на сходимость результатов в разных трубах. Отличия определяются в основном разными условиями проведения испытаний, например параметрами положения – загрузкой автомобиля и др. На результаты испытаний влияют конструкция АТ, методика, применение поправок. В каждой трубе существуют свои наработанные годами методики измерений с учетом поправок.

В качестве примера приведем данные аэродинамических испытаний некоторых легковых автомобилей в различных трубах.

Французский легковой автомобиль 1970 г. выпуска Citroen GS продут в АТ Saint – Cyr. Величина коэффициента C_x равна 0,318. При испытаниях в других АТ получено: АТ Ford –

$\Delta C_x = +0,001$; АТ DB – $\Delta C_x = -0,002$; АТ Fiat – $\Delta C_x = -0,003$; АТ DNW – $\Delta C_x = +0,003$; АТ VW – $\Delta C_x = +(0,004 - 0,052)$.

Автомобиль 1974 г. выпуска Citroen CX: АТ MIRA – $C_x = 0,39$; АТ Saint-Cyr – $C_x = 0,378$; АТ VW – $C_x = 0,4$.

Автомобиль 1975 г. выпуска Ford Fiesta: АТ MIRA – $C_x = 0,43$; 0,44; АТ Saint-Cyr – $C_x = 0,41$; АТ VW – $C_x = 0,43$.

Автомобиль 1980 года выпуска Ford Escort: АТ MIRA – $C_x = 0,41$; АТ DB – $C_x = 0,39$; 0,401; АТ Ford – $C_x = 0,385$.

Автомобиль 1975 г. выпуска VW Golf: АТ MIRA, АТ VW – $C_x = 0,42$; АТ Saint-Cyr – $C_x = 0,415$; АТ DB – $C_x = 0,421$; АТ JARI – $C_x = 0,46$.

Автомобиль Opel Ascona 1979 г. выпуска: АТ DB – $C_x = 0,41$; АТ JARI – $C_x = 0,49$; АТ GM, VW, PF – $C_x = 0,39$.

Анализ указывает на то, что аэродинамические трубы MIRA и VW несколько завышают величину коэффициента C_x по отношению, например трубы Saint-Cyr. Результаты испытаний в АТ Saint-Cyr и АТ Pininfarina совпадают, что отчасти объяснимо работой последней с автомобилями французских фирм.

Специалисты, работающие в аэродинамических трубах, ведут сравнительный учет результатов испытаний по отношению к другим трубам. Например, в отечественных АТ НИЦИАМТ и АТ НТЦ АвтоВаза получают практически тождественные результаты для одних и тех же объектов. Но величины коэффициента C_x несколько завышены по отношению к результатам некоторых европейских АТ.

Условия проведения дорожных испытаний и в АТ различны, что и определяет различие в результатах. Основное отличие состоит в том, что в дорожных условиях автомобиль движется относительно неподвижной опорной поверхности, в трубных же испытаниях объект неподвижен – движется воздух. При эксперименте в АТ на опорной поверхности образуется переменный по толщине пограничный слой, влияющий на характеристику воздушного потока, обтекающего объект испытаний. На результаты дорожных испытаний влияет зависимость от погодных условий.

В отечественной практике проведения дорожных испытаний известна методика [2] предложенная Петрушовым В.А., дающая вполне достоверные результаты, а также методика определения коэффициента лобово-

го сопротивления C_x в дорожных условиях с использованием аэродинамического экрана, предложенная группой исследователей кафедры «Автомобили» МАМИ [3].

В итальянском автомобильном журнале *Quattro ruote* регулярно публикуются результаты дорожных аэродинамических испытаний легковых автомобилей, проводимых редакцией на собственном полигоне. Оборудование полигона позволяет определять площадь поперечного сечения испытуемого автомобиля с использованием лазерного оборудования и величину коэффициента лобового сопротивления C_x методом выбега. Величина коэффициента C_x незначительно отличается с минимальным завышением от результатов трубных испытаний, указанных в различных технических публикациях.

В четырех европейских аэродинамических трубах [4] был испытан натуральный автомобиль Fiat Ritmo с целью определения сходимости и сравнения результатов с дорожными. Аэродинамические трубы CRF исследовательского центра Фиат, PF фирмы Pininfarina, VW концерна Фольксваген, DB Даймлер – Бенц имеют замкнутый контур с открытой рабочей частью. Максимальные стандартные отклонения составляют 2,29 %. В среднем, измеренные значения воздушного сопротивления ниже на 1,7 % в АТ CRF и выше на 0,9 % в АТ VW. Выяснено, что отсутствие вращения колес и наличие пограничного слоя на опорной поверхности, имитирующей земную, очень мало влияет на измерения. Величина коэффициента C_x , измеренная методом инерционного движения автомобиля при дорожных испытаниях, несколько выше ($\Delta C_x = +0,006$) значения, измеренного в АТ. Погрешность измерения коэффициента C_x в дорожных испытаниях составляет чуть более 1,5 % от результатов в АТ.

В американской автомобильной корпорации GM были проведены корреляционные исследования аэродинамических результатов дорожных и трубных испытаний [5]. Объектами испытаний являлись пять автомобилей разных типов кузовов (величина коэффициента C_x варьировалась от 0,23 до 0,54). Зафиксированная величина коэффициента C_x , измеренная в аэродинамической трубе, была ниже на 0,026–0,030 (в среднем на 8,5 %), чем полученная при проведении дорожных испытаний.

При анализе массива результатов испытаний автомобилей (более ста единиц) на дороге

и в АТ нами получено: среднее отклонение коэффициента C_x равно 10 % в сторону увеличения значений для дорожных испытаний относительно трубных результатов.

В ряде статей указаны средние величины коэффициента лобового сопротивления C_x легковых автомобилей для конкретного периода времени. Эти сведения касаются небольших массивов автомобилей и узких периодов времени, а не всей истории автомобилизации.

В статье [6], датированной 1976 г., приводится средняя величина коэффициента лобового сопротивления C_x для 91 европейского автомобиля равная 0,46. Положительным являлось то, что все объекты исследований были серийными автомобилями и их продувка велась в одной аэродинамической трубе концерна «Фольксваген».

Коэффициент лобового сопротивления C_x легковых автомобилей, особенно современных, может иметь значения меньше 0,3 и даже меньше 0,2. Однако по данным некоторых исследований, для тел автомобильного типа с тупой задней частью кузова, имеющих колеса, находящиеся рядом с землей коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,15$ является нижним пределом [7].

В октябрьском номере журнала *Automotive Engineer* в 1982 году Gordon Taylor [8] приводит среднюю величину коэффициента C_x равную 0,42. Забегая вперед, с помощью расчетных уравнений для данного периода времени нами получено значение коэффициента C_x равное 0,43.

Алгоритм проведенного нами анализа следующий:

- на первом этапе для определения зависимости используем весь массив данных о величинах коэффициентов лобового сопротивления, аэродинамического фактора серийных автомобилей. В результате обработки данных определяем функциональную зависимость C_x и $C_x F$ для автомобиля нужного временного отрезка времени.

- на втором этапе определяем влияние аэродинамических показателей легковых автомобилей в зависимости от принадлежности к какому-либо классу европейской классификации. Второй этап, по сути определяет влияние длины автомобиля во времени. Аэродинамическими исследованиями доказана зависимость величины коэффициента лобового сопротивления C_x от изменения длины автомобиля [9].

Результаты и обсуждение

По результатам анализа величин аэродинамического коэффициента лобового сопротивления C_x для почти полутора тысяч серийных легковых автомобилей получено уравнение:

$$C_x = -0,0025x + 5,3845, \quad (1)$$

где x – год начала производства автомобиля.

Сравнивая средние значения коэффициента C_x , опубликованные в печати для конкретных исторических периодов, указываем на малую погрешность приведенного расчетного уравнения. Величина коэффициента воздушного сопротивления C_x ежегодно уменьшается на 0,0025.

Для определения расчетного уравнения величины аэродинамического фактора от времени использованы данные более 800 легковых автомобилей:

$$C_x F = -0,0036x + 7,8524, \quad (2)$$

где x – год начала производства автомобиля.

В среднем, из анализа следует, что величина аэродинамического фактора уменьшается на 0,0035 ежегодно.

Принимая во внимание, что абсолютные величины коэффициента C_x и аэродинамического фактора разнятся, то в процентном соотношении величина $C_x F$ отстает в своем изменении, что подтверждается графически.

При проектировании автомобиля Mercedes-Benz C 111 на третьем этапе [10] последовательно изменялась длина кузова с 4784 мм до максимального значения равного 6284 мм (+30 %). Максимальное удлинение уменьшило величину коэффициента C_x на 15 %. Впоследствии, эти знания были использованы при создании концептуального автомобиля IAA ($C_x = 0,19$) в 2015 г. Автомобиль IAA имел кузов переменной длины (5391–5430 мм). Авторами статьи при подобном аэродинамическом эксперименте с масштабной моделью легкового автомобиля получено 10 % уменьшение величины коэффициента C_x при 10 % сокращении длины объекта [9, 11].

Исходя из этого проведен анализ изменения аэродинамических показателей для легковых автомобилей в зависимости от принадлежности к определенному классу по европейской классификации. Согласно классификации, принадлежность автомобиля к тому или иному классу определяется геометрическими параметрами.

Эволюция внешней формы кузова автомобиля начиналась с каретного периода.

На рис. 1 представлен дедушка всех серийных автомобилей Ford T. Автомобиль выпускался с 1908 по 1927 г. Выпущено 15007033 автомобиля. Длина 3550 мм, ширина 1650 мм, высота 1860 мм, колесная база 2550 мм, коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,7$, площадь миделя $F = 2,41 \text{ м}^2$, аэродинамический фактор $C_x F = 1,69 \text{ м}^2$.



Рис. 1. Знаменитый американский автомобиль Ford T, первый автомобиль конвейерного производства

С момента появления автомобиля, когда кузов напоминал карету, площадь F имела значения, значительно превышающие 2 м^2 .

Созданием обтекаемых автомобильных кузовов в 20-х гг. прошлого столетия занимались многие исследователи. Предлагались разнообразные внешние формы. Но эти формы выбирались интуитивно, их аэродинамические качества определялись примитивными способами, в том числе и упрощенными расчетными. Объектами испытаний, исследований чаще являлись масштабные модели, что снижало достоверность результатов.

В 1921 г. немецкий авиаконструктор Rumpler представил автомобиль с обтекаемым кузовом Tropfenwagen (рис. 2). Аэродинамические испытания были проведены в исследовательском бюро Эйффеля во Франции. Отличные показатели ($C_x = 0,28$) были подтверждены продувкой натурального образца автомобиля в аэродинамической трубе фирмы Volkswagen в 1979 г.

Величина аэродинамического фактора этого автомобиля равна $0,72 \text{ м}^2$.

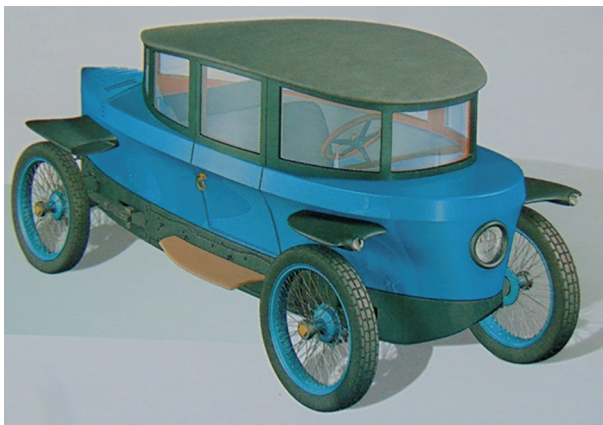


Рис. 2. Автомобиль Rumber Tropfenauto

Появление после второй мировой войны так называемых понтонных кузовов привело к значительному улучшению аэродинамики автомобилей.

В 60-е гг. прошлого столетия тенденция поменялась в сторону уменьшения высоты кузова, а, следовательно, и площади F . Затем высота кузова легкового автомобиля выросла для улучшения комфорта езды. В моду вошли кузова с «обрубленной» хвостовой частью – хэтчбеки. В результате анализа технических данных серийных легковых автомобилей практически за всю историю автомобилестроения нами определены изменения величины площади поперечного сечения (F) для всех классов.

Класс А – площадь F изменилась с 1,44 до 1,83 м²;

Класс В – площадь F изменилась с 1,72 до 2,14 м²;

Класс С – площадь F изменилась с 1,70 до 2,27 м²;

Класс D – площадь F изменилась с 1,78 до 2,18 м²;

Класс E – площадь F изменилась с 1,77 до 2,30 м²;

Класс F – площадь F изменилась с 1,86 до 2,58 м².

На рис. 3 и 4 представлены показатели легковых автомобилей германского концерна BMW двух серий, относящихся к разным классам. В анализе участвовали только автомобили с кузовами седан.

Анализ аэродинамических показателей BMW подтверждает мнение о лучших величинах для автомобилей более высоких классов.

Для повышения достоверности анализа аэродинамических показателей выберем автомобили разных поколений, относящиеся к

одному конкретному классу. В качестве примера сравним показатели автомобилей BMW 5-ой серии и Mercedes-Benz E-класса (рис. 5).

Легковые автомобили Mercedes-Benz E-класса при сравнении с автомобилями BMW 5-ой серии после 80-х гг. имеют лучшие показатели.

Если брать за критерий величину аэродинамического фактора, то лидерами будут французский Citroen, японская Toyota, германские Mercedes, BMW, Audi. Затем следуют японская Mazda и поделившие седьмую позицию французский Peugeot и шведская Volvo.

Среди отстающих производителей, чьи аэродинамические показатели значительно уступают средней величине аэродинамического фактора, итальянский Fiat, японский Mitsubishi, американский Ford и французский Renault.

Толчками для развития автомобильной аэродинамики в большой степени становятся нефтяные мировые кризисы, возникающие с интервалами в 9 лет.

Для автомобилей всех классов в результате обработки данных определены линейные уравнения, по которым возможен расчет величин коэффициента лобового сопротивления автомобиля и аэродинамического фактора для конкретного года выпуска.

Класс А (1936–2009 гг.)

$$C_x = -0,0029x + 6,0839 \quad (3)$$

$$C_x F = 0,0005x + 1,6817 \quad (4)$$

Класс В (1948–2013 гг.)

$$C_x = -0,0033x + 6,9936 \quad (5)$$

$$C_x F = -0,0031x + 6,8305 \quad (6)$$

Класс С (1946–2017 гг.)

$$C_x = -0,0033x + 6,9326 \quad (7)$$

$$C_x F = -0,0035x + 7,6827 \quad (8)$$

Класс D (1934–2016 гг.)

$$C_x = -0,0037x + 7,7819 \quad (9)$$

$$C_x F = -0,0055x + 11,537 \quad (10)$$

Класс E (1955–2017 гг.)

$$C_x = -0,003x + 6,3437 \quad (11)$$

$$C_x F = -0,0049x + 10,485 \quad (12)$$

Класс F (1977–2011 гг.)

$$C_x = -0,0033x + 6,6627 \quad (13)$$

$$C_x F = 0,0027x + 6,2155 \quad (14)$$

Линейные уравнения дают достаточную ясную картину изменения аэродинамических показателей и облегчают их расчет.

Приводим аэродинамические показатели для марок автомобилей внутри классов.

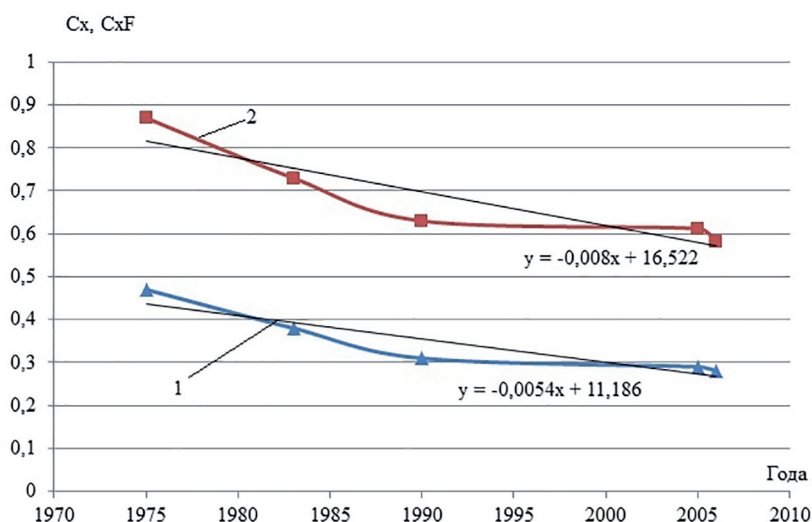


Рис. 3. Зависимость изменений от времени выпуска значения коэффициента C_x и аэродинамического фактора $C_x F$ для поколений автомобиля BMW 3-ей серии:

1 – график C_x ; 2 – график $C_x F$

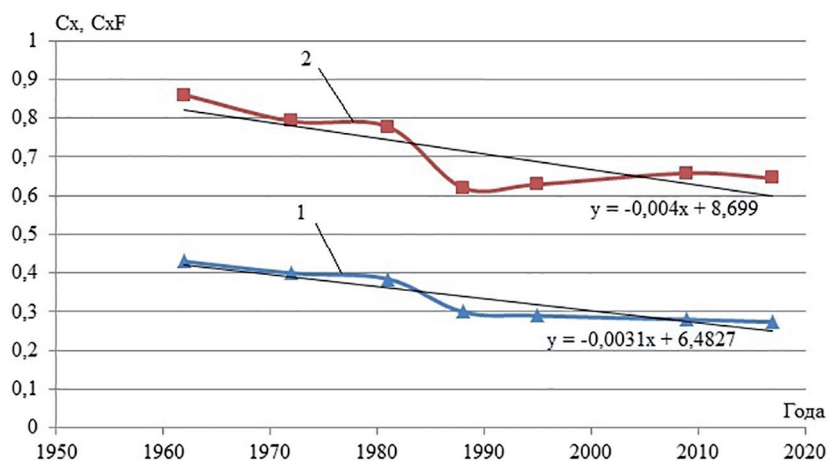


Рис. 4. Зависимость изменения от времени выпуска значений коэффициента C_x и аэродинамического фактора $C_x F$ для поколений автомобиля BMW 5-ой серии:

1 – график C_x ; 2 – график $C_x F$

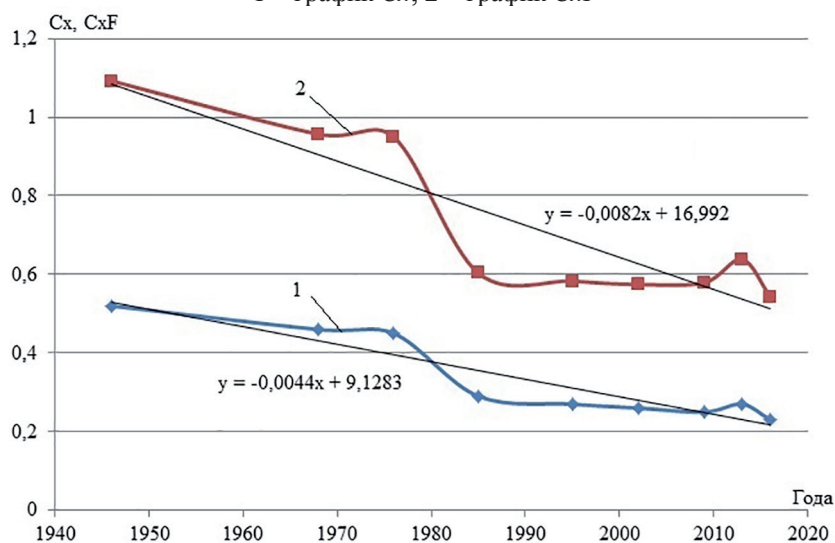


Рис. 5. Зависимость изменения от времени выпуска значений коэффициента C_x и аэродинамического фактора для поколений автомобиля Mercedes E-класса:

1 – график C_x ; 2 – график $C_x F$

Класс легковых автомобилей А.

Класс А называют классом городских автомобилей по простой причине – их малой длине. Автомобили этого класса, как показывает анализ автомобильной истории, появились сразу после Второй мировой войны. Потребность в дешевом транспорте у населения Европы была большая. И малые автомобили чаще с мотоциклетными двигателями, с малым весом и неприхотливые в обслуживании были воистину народными. Такие автомобили производились в Италии (Fiat 500, Isetta 250), Франции (Citroen 2CV), Германии (BMW600, Messerschmitt KR 200).

Общепризнанным фактом является, что наибольший вклад в развитие автомобилей класса А внес английский Austin Mini (рис. 6). Создателем этого чуда был Алек Исигонис. Автомобиль выпускался с 1959 по 2000 г. Тираж составил 5 387 862 автомобиля. Отличительным было: передний привод, поперечное расположение двигателя, вместимость кузова при скромной его длине. Длина автомобиля составляла 3050 мм, ширина – 1400 мм, высота – 1350 мм, колесная база – 2040 мм. Коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,48$, площадь поперечного сечения равна $1,57 \text{ м}^2$, аэродинамический фактор равен $0,7536 \text{ м}^2$.



Рис. 6. Автомобиль Austin Mini

Выявлено, что аэродинамический фактор автомобилей этого класса французской фирмы Peugeot в интервале с 1972 по 1980 гг. имел тенденцию к росту. За этот период величина фактора $C_x F$ выросла на 4,4 %.

Величина аэродинамического фактора итальянских автомобилей Fiat увеличилась на 6% за период с 1936 по 2009 гг.

Аэродинамический фактор французских автомобилей фирм Renault и Citroen уменьшался. Для Renault на 17,3 % за период с 1972 по 1986 гг.

Для автомобилей Citroen снижение величины фактора составило 21,7 % за период с 1978 по 1986 гг. По имеющимся данным трубного эксперимента меньшей величиной аэродинамического фактора обладает автомобиль Citroen AX 1986 г. выпуска – $0,5394 \text{ м}^2$. Это подтверждает известный факт лидирующего положения фирмы в области аэродинамики.

Худший в этом классе французский автомобиль Renault 5TL 1977 г. выпуска (аэродинамический фактор равен $0,7404 \text{ м}^2$).

Для автомобилей класса А величина аэродинамического фактора равная $0,54 \text{ м}^2$ является той, к которой необходимо стремиться.

Класс легковых автомобилей В.

Этот класс более многочисленный. Среди автомобилей всех фирм есть тенденция к снижению во времени величины аэродинамического фактора.

За период с 1948 по 2013 гг. величина аэродинамического фактора $C_x F$ в среднем уменьшилась с $0,933$ до $0,686 \text{ м}^2$ (–37 %).

Для автомобилей Citroen класса В произошло снижение аэродинамического фактора с 1948 г. ($0,9212 \text{ м}^2$) по 2002 г. ($0,6458 \text{ м}^2$) – 30 %.

Для автомобилей Peugeot с 1965 по 2012 гг. снижение величины аэродинамического фактора с $0,6305 \text{ м}^2$ в 1965 г. до $0,5648 \text{ м}^2$ в 2012 г. Снижение фактора составило 10 %.

Японский автомобиль Toyota Starlet 1996 г. выпуска имел $C_x F = 0,54214 \text{ м}^2$, немецкий Audi A2 выпуск 2000 г. – $C_x F = 0,544 \text{ м}^2$. Худшими в этом классе являются Toyota Tercel Liftback 1980 г ($C_x F = 0,945 \text{ м}^2$) и Citroen 2CV (1948 г., $C_x F = 0,933 \text{ м}^2$).

Французский автомобиль Citroen 2CV (рис. 7), имеющий большую величину аэродинамического фактора является историческим явлением. Появившись в 1948 г., автомобиль выпускался 42 года! За это время продано 3 873 294 экземпляров. Автомобиль имел передний привод, 2-х цилиндровый оппозитный двигатель воздушного охлаждения, сухой вес равен 555 кг при длине 3820 мм, ширине 1480 мм, высоте 1600 мм и колесной базе 2400 мм. Коэффициент $C_x = 0,508$. Площадь миделя равна $1,65 \text{ м}^2$. Аэродинамический фактор $C_x F = 0,8392 \text{ м}^2$. Этот автомобиль задал ориентир следующим, признанным авто-

мобильным сообществом передовыми, французским автомобилям Renault 4 (1961–1992 гг.) и Renault 5 (1972–1997 гг.)



Рис. 7. Автомобиль Citroen 2CV

Класс легковых автомобилей С.

Самый многочисленный класс автомобилей. На его долю приходится 30 % продаж. В анализе участвуют 256 автомобилей 16 фирм. Временной период имеющегося массива данных составляет с 1946 по 2017 гг. Величина аэродинамического фактора уменьшена за этот период (0,8717 – 0,6232 м²) на 28 %.

Из анализа величины аэродинамического фактора для автомобилей класса С следует, что ориентиром является $C_xF = 0,52 \text{ м}^2$.

По данным расчета:

Автомобили фирмы Mercedes-Benz в 1946 г. имели $C_xF = 1,339 \text{ м}^2$; в 2012 г. $C_xF = 0,701 \text{ м}^2$;

Автомобили фирмы Volkswagen 1961 г. выпуска имели $C_xF = 0,8094 \text{ м}^2$; в 2013 г. $C_xF = 0,6898 \text{ м}^2$;

Автомобили фирмы Ford – в 1962 г. $C_xF = 0,7948 \text{ м}^2$; в 2017 г. $C_xF = 0,6463 \text{ м}^2$;

Автомобили фирмы BMW – в 1966 г. $C_xF = 0,9064 \text{ м}^2$; в 2014 г. $C_xF = 0,748 \text{ м}^2$;

Автомобили (LADA) отечественного завода АвтоВаз в 1970 г. $C_xF = 0,857 \text{ м}^2$; в 2010 г. $C_xF = 0,669 \text{ м}^2$. Неплохие показатели в своем классе.

Класс С часто называют Golf-классом, в знак признания заслуг автомобиля Volkswagen Golf в развитии конструкции и внешнего вида. Переднеприводный автомобиль с кузовом хэтчбек, спроектированный известным итальянским дизайнером Джорджетто Джуджаро в 1974 г. (рис. 8). Автомобиль имеет величину коэффициента $C_x = 0,42$, площадь поперечного сечения 1,83 м², аэродинамический фактор равен 0,769 м². Выпуск первой модели прекращен в 1983 г. В настоящее время выпускается седьмое поколение.

Не надо забывать про легендарный автомобиль Volkswagen 1200 или «Жук» (рис. 9). Созданный талантливым конструктором Фердинандом Порше, он стал символом надежности и практичности. Выпускался с 1945 года по 2003 год тиражом более 22 млн. штук. Геометрические параметры: длина 4030 мм, ширина 1550 мм, высота 1500 мм, колесная база 2400 мм. Величина лобового сопротивления воздуха C_x по разным источникам варьируется от 0,38 до 0,65. Реалистичное значение C_x равно 0,458. Площадь поперечного сечения равна 1,80 м², при этом величина аэродинамического фактора равна 0,8244 м².

Класс легковых автомобилей D.

Исторический диапазон 1934–2016 гг. В анализе рассмотрено 124 автомобиля. В указанном диапазоне аэродинамический фактор изменился на 50 % – $C_xF = 0,900–0,449 \text{ м}^2$.

Расчетные значения аэродинамического фактора для легковых автомобилей следующих компаний и фирм:

– японская Mazda (1979–2015 гг.) – $C_xF = 0,7344–0,6084 \text{ м}^2$;

– японская Toyota в 1977 г. – $C_xF = 0,7467 \text{ м}^2$; в 2016 г. – $C_xF = 0,511 \text{ м}^2$;



Рис. 8. Автомобиль Volkswagen Golf

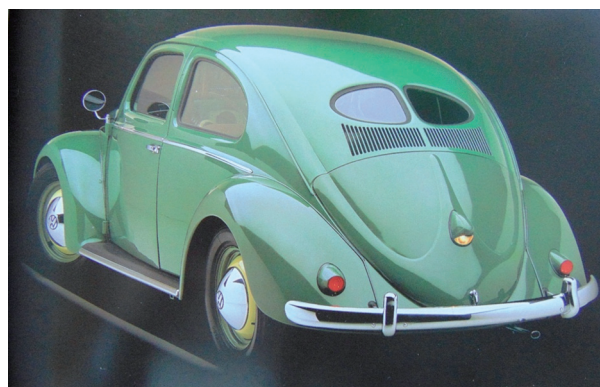


Рис. 9. Автомобиль Volkswagen 1200 («Жук»)

– германская Mercedes-Benz в 1982 г. – $C_xF = 0,6178 \text{ м}^2$; в 2003 г. – $C_xF = 0,538 \text{ м}^2$;
 германская Volkswagen в 1969 г. – $C_xF = 0,7642 \text{ м}^2$; в 2009 г. – $C_xF = 0,6242 \text{ м}^2$;
 – германская BMW в 1962 г. – $C_xF = 0,9276 \text{ м}^2$; в 2010 г. – $C_xF = 0,582 \text{ м}^2$.

По результатам трубных испытаний лучшие показатели аэродинамического фактора в этом классе у автомобиля с гибридной силовой установкой Toyota Prius (V) $C_xF = 0,5129 \text{ м}^2$ и Nissan Silvia (S14) – $C_xF = 0,509 \text{ м}^2$. Оба автомобиля произведены в Японии.

Худший показатель у французского автомобиля Citroen 7 CV (1934 г., аэродинамический фактор $C_xF = 1,23 \text{ м}^2$ при лобовой площади равной $2,2 \text{ м}^2$).

Класс легковых автомобилей E.

Исторический диапазон 1955–2017 гг. В анализе участвует 161 автомобиль. Для класса средняя величина аэродинамического фактора изменяется $C_xF = 0,8124 - 0,5334 \text{ м}^2$:

Автомобили Mercedes (1967–2016 гг.). Фактор $C_xF = 0,9099 - 0,5522 \text{ м}^2$;

Автомобили Citroen (1955–1989 гг.). Фактор $C_xF = 0,837 - 0,6466 \text{ м}^2$;

Автомобили BMW (1972–2009гг.). Фактор $C_xF = 0,8748 - 0,712 \text{ м}^2$ [12].

Автомобиль Citroen SM 1970 г. выпуска имеет низкую величину $C_xF = 0,468 \text{ м}^2$.

Американский автомобиль Ford Galaxie 1965 г. выпуска имеет худшую величину $C_xF = 1,2084 \text{ м}^2$.

Иконой этого класса автомобилей считается французский Citroen DS (1955–1975 гг.). Автомобиль имел оригинальный дизайн от Фламинио Бертони (рис. 10), гидропневматическое сцепление, усилитель руля, усилитель тормозов, подвеску с изменением дорожного просвета. Длина автомобиля равна 4840 мм, ширина 1790 мм, высота 1470 мм, колесная база 3125 мм. Аэродинамические показатели, приводимые в различных технических источниках, отличаются радикальным образом. Приводим значения коэффициента лобового сопротивления этого автомобиля – 0,3; 0,31; 0,311; 0,312; 0,326; 0,34; 0,36; 0,38; 0,382; 0,39; 0,56. Площадь поперечного сечения указана $1,988 \text{ м}^2$ и $2,136 \text{ м}^2$. При таких разбросах исходных показателей величина фактора обтекаемости колеблется от $0,5964 \text{ м}^2$ до $1,1962 \text{ м}^2$.



Рис. 10. Автомобиль Citroen DS

На наш взгляд, необходимо отметить в этом классе и немецкий автомобиль NSU RO 80 с роторным двигателем (рис. 11). И отметить в первую очередь прекрасные для своего времени аэродинамические качества ($C_x = 0,355$, $C_xF = 0,7 \text{ м}^2$). Автомобиль производился с 1967 по 1977 гг. Средний автомобиль того времени имел коэффициент C_x равный 0,467. Таким образом, аэродинамические качества NSU RO 80 опережали средние показатели как минимум на десять лет. Дизайн кузова автомобиля до сих пор смотрится свежо.



Рис. 11. Автомобиль NSU RO 80

Класс легковых автомобилей F.

Рассматриваемый исторический диапазон с 1977 по 2011 гг. В анализе участвуют 25 автомобилей. Величина аэродинамического фактора C_xF изменяется в рассматриваемом периоде времени – $0,8776 - 0,7858 \text{ м}^2$.

Для автомобилей Mercedes в период 1979–2002 гг. аэродинамический фактор C_xF изменяется $0,6641 - 0,8128 \text{ м}^2$.

Для автомобилей BMW (1977–2009 гг.) аэродинамический фактор $C_xF = 0,9109 - 0,7093 \text{ м}^2$.

Автомобили-одноклассники, имеющие практически равную величину аэродинамического фактора, американский Ford Thunderbird SC (1989 г. $C_xF = 0,616 \text{ м}^2$) и германский Mercedes-Benz S (W220) 2000 г. выпуска, $C_xF = 0,618 \text{ м}^2$). Первый имеет худший коэффициент C_x , но

меньшую площадь поперечного сечения относительно второго.

Худший автомобиль 1980 года выпуска BMW 745i ($C_x F = 0,963 \text{ м}^2$).

Автомобили высшего класса имеют большую длину, что способствует хорошей обтекаемости кузова. Отличие в аэродинамических показателях автомобилей класса F определяется величиной площади поперечного сечения.

Автомобиль высшего класса Rolls-Royce Ghost выпуска 2011 г. при геометрических параметрах (длина 5399 мм, ширина 1948 мм, высоте 1550 мм и колесной базе 3295 мм) имеет коэффициент C_x равный 0,33 и аэродинамический фактор $C_x F = 0,863 \text{ м}^2$.

Прямой конкурент – автомобиль Maybach 62 (рис. 12) 2002 г. выпуска [13] при длине 6165 мм, ширине 1980 мм, высоте 1573 мм, колесной базе 3827 имеет коэффициент C_x равный 0,31 и аэродинамический фактор 0,8128 м^2 .



Рис. 12. Автомобиль Maybach 62

Заключение

Основным выводом анализа аэродинамических показателей является подтверждение факта уменьшения со временем величины коэффициента лобового сопротивления легковых автомобилей. Результатом обработки аэродинамических данных около 1500 легковых серийных автомобилей стало расчетное уравнение, определяющее величину коэффициента лобового сопротивления C_x в зависимости от даты производства с большой долей вероятности ($\pm 0,02$):

При этом с большой степенью достоверности благодаря значительному массиву данных определена зависимость уменьшения величины аэродинамического фактора на протяжении всего периода производства легковых автомобилей.

В статье приводится расчетное уравнение для определения величины аэродинамического фактора $C_x F$ в зависимости от даты производства.

Литература

1. Королев Е.В., Жамалов Р.Р., Котин А.И. Аэродинамические трубы как инструмент исследования. Вестник НГИЭИ. Вып. 12 (19). Княгинино: НГИЭИ, 2012. – 122 с.
2. Петрушов В.А. Новый метод определения сопротивления движению автомобиля. Автомобильный транспорт, 1982, № 11. С. 13–17.
3. Бернацкий В.В., Зверев И.Н., Смирнов В.А. Определение C_x автомобиля при помощи экрана. Автомобильная промышленность, 1991, № 6. С. 16.
4. Costelli A., Garrone A., Visconti A., Buchheim R., Cogotti A., Kuhn A. FIAT research center reference car: correlation tests between four full scale European wind tunnels and road. “SAE Techn, Pap, Ser.”, 1981, № 810137, pp. 1–43.
5. Gary W. Eaker. Wind Tunnel – to – Road Aerodynamic Drag Correlation, SAE Paper 880250.
6. Hucho W.H., Janssen L.J., Emmelmann, H.J. The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Vehicles. SAE – Paper 760185, Detroit, 1976.
7. Бернацкий В.В., Острцов А.В. Исследование аэродинамики автомобиля. Монография. М.: ИНФРА-М, 2015. – 255 с.
8. Gordon Taylor Advances in vehicle aerodynamics Automotive Engineer, octobere / november 1982, s. 44–46.
9. Королев Е.В., Жамалов Р.Р. Влияние длины и угла наклона задней части масштабной модели легкового автомобиля на ее аэродинамические показатели // Автомобильная промышленность, № 5, 2014.
10. Reiner W. Schlegelmilch, Hartmut Lehbrink, Jochen von Osterroth MERSEDES h.f.ullmann. 2007. 599 p.
11. Королев Е.В., Жамалов Р.Р. Экспериментальное исследование влияния габаритных размеров масштабных моделей плохообтекаемых тел на аэродинамические характеристики // Автомобильная промышленность, № 11, 2014.
12. Льюин Т. BMW – Полная книга. Все модели с 1950 года. Пер. с англ. М.: ФАИР.2008. – 384 с.
13. Понтер Енгелен. Легковые автомобили Mercedes-Benz с 1996 г. до наших дней. М.: АСТ: Астрель: 2007. – 479 с.

References

1. Korolev E.V., Zhamalov R.R., Kotin A.I. Aerodynamic tubes as a research tool. Vestnik NGIENI. Vyp.12 (19). Knyaginino: NGIENI Publ., 2012. 122 p.

2. Petrushov V.A. A new method for determining the resistance to movement of automobiles. *Avtomobil'nyj transport*, 1982, No 11, pp. 13–17 (in Russ.).
3. Bernackij V.V., Zverev I.N., Smirnov V.A. Definition of the Cx of automobiles using the screen. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 1991, No 6, p. 16 (in Russ.).
4. Costelli A., Garrone A., Visconti A., Buchheim R., Cogotti A., Kuhn A. FIAT research center reference car: correlation tests between four full scale European wind tunnels and road. "SAE Techn, Pap, Ser.", 1981, № 810137, pp. 1–43
5. Gary W. Eaker. Wind Tunnel – to – Road Aerodynamic Drag Correlation, SAE Paper 880250.
6. Hucho W.H., Janssen L.J., Emmelmann, H.J. The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Vehicles. SAE – Paper 760185, Detroit, 1976
7. Bernackij V.V., Ostrecov A.V. *Issledovanie aerodinamiki avtomobilya* [Study of aerodynamics of automobiles]. Monografiya. Moscow: INFRA-M Publ., 2015. 255 p.
8. Gordon Taylor Advances in vehicle aerodynamics *Automotive Engineer*, octobre / november 1982, s. 44–46.
9. Korolev E.V, ZHamalov R.R. Influence of the length and angle of inclination of the rear part of the scale model of a passenger automobiles on its aerodynamic parameters. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, No 5, 2014. (in Russ.).
10. Reiner W. Schlegelmilch, Hartmut Lehbrink, Jochen von Osterroth MERSEDES h.f.fullmann. 2007. 599 p.
11. Korolev E.V, ZHamalov R.R. Experimental study of the influence of overall dimensions of scale models of poorly streamlined bodies on aerodynamic characteristics. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, No 11, 2014. (in Russ.).
12. L'yuin T. *BMW – Polnaya kniga. Vse modeli s 1950 goda* [BMW - Full book. All models since 1950]. Per. s angl. Moscow: FAIR Publ. 2008. 384 p.
13. Ponter Engelen. *Legkovye avtomobili Mercedes – Benz s 1996 g. do nashih dnei* [Mercedes - Benz cars from 1996 to the present day]. Moscow: AST: Astrel' Publ.: 2007, 479 p.

AGE OF AERODYNAMICS OF AUTOMOBILES

Ph.D. **E.V. Korolev**¹, Ph.D. **R.R. ZHamalov**¹, Ph.D. **V.V. Bernackij**²

¹Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Nizhny Novgorod, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

vladislav_bern@mail.ru

The article analyzes the time variation of the values of the coefficient Cx and the aerodynamic factor for passenger vehicles of leading companies. Calculated equations of aerodynamic indexes are presented, both for the whole array of automobiles and for breaking them into classes according to the European classification. The analysis uses aerodynamic indicators of the main types of bodies of vehicles obtained both during road tests and in experiments in wind tunnels with full-scale objects. Examples are given of the discrepancy between aerodynamic indicators and the results of the correlation studies of automobiles produced under different conditions, in different wind tunnels and its comparison with road tests. The reasons for these discrepancies are indicated. Examples are given of the change in aerodynamic indicators from the time of the release of generations of some brands of automobiles. The best and worst vehicles in aerodynamics for all six classes of European classification are indicated. The novelty is the determination of the regularity of the change in aerodynamic parameters, in particular of the aerodynamic factor, for the whole period of development of motorization, which requires the use of a large data set. The results of the analysis are also given. The result of the analysis is the conclusion that the amount of the aerodynamic factor of passenger vehicles is decreasing for the whole time of automobilization with a change in the external form of the body.

Keywords: time, changes, automobiles, air resistance, coefficient Cx, aerodynamic factor, automobile classes, calculation.