

УДК 537

АЭРОДИНАМИКА КАК КЛЮЧЕВЫЙ ПРИНЦИП В АВТОМОБИЛЕ-СТРОЕНИИ

Бекешев А.Д., студент гр.ИБс-251, I курс

Научный руководитель: Пузынин А.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики

Кузбасский государственный технический университет
Имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Введение

Современное автомобилестроение находится на этапе технологической трансформации, где ключевыми вызовами становятся энергоэффективность, экология и безопасность. Актуальность данной работы обусловлена существенной ролью аэродинамики в решении этих глобальных задач. Автоспорт выступает как высокотехнологичный полигон, где в экстремальных условиях отрабатываются инженерные решения, которые в последствии могут интегрироваться в гражданскую жизнь.

Управление воздушными потоками позволяет балансировать между минимальным лобовым сопротивлением для достижения максимальной скорости и максимальной прижимной силой для обеспечения управляемости. Научная новизна исследования заключается в разработке методики формирования трёх различных аэродинамических конфигураций и проведения сравнительного анализа через призму триады целей: «Скорость – Управляемость – Универсальность», а также в разработке универсального алгоритма выбора аэродинамического комплекта исходя из исходных данных.

Цель работы:

Анализ влияния аэродинамически характеристики скорости и управляемости автомобиля, а также разработка оптимальных конфигураций для различных условий эксплуатации, освещение важности аэродинамики в автомобильной сфере.

Задачи:

1. Изучить принципы работы аэродинамики.
2. Сформировать и сравнить три варианта настройки аэродинамического пакета: для максимизации скорости, для максимизации управляемости и комбинированный (компромиссный) вариант.
3. Разработать алгоритм оптимального выбора аэродинамических элементов кузова.
4. Оценить потенциальный экологический эффект от внедрения оптимизированных решений в виде снижения расхода топлива.

1. Основы аэродинамики и её применение в автомобилях.

Аэродинамика — это наука о законах движения воздуха и силовом взаимодействии между телом и обтекающим его воздухом (в переводе с греческого «аэро» — воздух, «динамис» — сила).[1] Основными терминами, которые будут использоваться это: зона высокого и низкого давления (это области с различным давлением, которые возникают при обтекании тела воздушным потоком.); сила сопротивления (сила, действующая на автомобиль против его движения.) и прижимная сила (сила, действующая перпендикулярно вниз, то есть прижимая).

Воздух движется подобно жидкости, просто мы не видим это, так что можно представить его как бесконечный «воздушный» океан. Очевидно, что воздух не такой плотный как жидкость, но тем не менее он ощутим и имеет трение, или можно сказать сопротивление — что и является самым важным аэродинамическим фактором. В общем виде формула силы сопротивления воздуха выглядит следующим образом:

$$Fd = k\rho Sv^2, \quad (1.1)$$

где Fd — сила сопротивления;

k — коэффициент лобового сопротивления;

ρ — плотность среды;

S — площадь минимального сечения движущегося тела (наибольшее по площади поперечное сечение тела, движущегося в жидкости или газе, плоскостью, перпендикулярной направлению движения);

v — скорость тела [2]

Из формулы силы сопротивления вытекает формула коэффициента сопротивления (1.2):

$$Cd = Fd / (0,5\rho v^2 A), \quad (1.2)$$

где Cd — коэффициент аэродинамического сопротивления;

Fd — сила сопротивления (Н);

ρ — плотность среды (кг/м³);

v — скорость объекта относительно среды (м/с);

A — характерная площадь (м²). Характерную площадь в данной статье будем рассматривать для автомобилей, а именно фронтальную площадь (проекция на плоскость, перпендикулярную направлению движения) [3].

Самую аэродинамичную природную форму имеет капля, Cd которой около 0,04. Важно учитывать, что сопротивление воздуха растёт пропорционально квадрату скорости, например сопротивление воздуха в 4 раза больше на скорости 110 км/ч, чем на 55 км/ч, что требует значительно больше работы, чтобы протолкнуть предмет через воздух. Если мы представим движущийся кирпич, то перед ним будет создаваться зона высокого давления, а позади — низкого, которое из-за разницы давлений будет тянуть кирпич назад.

У болидов Формулы 1 относительно высокое C_d (около 0,7, когда у больших внедорожников примерно 0,4), но они всё равно быстрые и более управляемые. Дело в том, что они разрабатываются с учётом прижимной силы, которое придавливает колёса и весь болид в целом к дороге, что приводит к большей устойчивости как на прямых участках, так и на поворотах, что позволяет проходить их быстрее и безопаснее.

Весь трюк заключается в разности давлений сверху и снизу болида. Если представить, что если давление сверху автомобиля будет на $0,69 \text{ Н/см}^2$ меньше, чем снизу, тогда площадь поверхности снизу около $7,9 \text{ м}^2$ (как пример: автомобиль Nissan 350Z) будет поднимать вверх сила примерно равная 5552 кг. Для достижения прижимной силы воспользуемся законом Бернулли, который гласит, что быстро двигающаяся жидкость оказывает давления меньше, чем медленно двигающаяся жидкость. Возьмём как пример антикрыло (спойлер) сзади автомобиля, тогда медленно проходящий воздух сверху будет создавать большее давление сверху, а то есть прижимную силу. Но почему он проходит снизу быстрее? Это происходит из-за формы антикрыла, когда воздух проходит через поверхность, то он стремится следовать вдоль этой поверхности (эффект Коанда (иногда эффект чайника) — стремление струи жидкости, вытекающей из отверстия, отклонится в сторону прилегающей плоскости или изогнутой поверхности.) [4], поэтому воздух, которому нужно пройти большее расстояние — ускоряется, что и создаёт прижимную силу. Но это справедливо только для больших спойлеров сзади, но вы могли заметить, что у машин есть небольшой выступ на багажнике, так как воздух стекающий с крыши автомобиля немного спускается вниз, создавая быстрый и плавный поток, образуется зона низкого давления, поднимая заднюю часть автомобиля, а этот небольшой выступ немного препятствует воздушному потоку, помогая убрать часть подъёмной силы, как бы портя воздушный поток, отсюда и название «Spoiler, от слова spoil — портить». [5]

Итак, мы разобрались как работает спойлер — он создаёт прижимную силу сзади, но, а как же перед? Для создания прижимной силы спереди используется сплиттер («Splitter»). Он, так сказать, подбивает скопившийся воздух перед автомобилем, который ещё не успел пройти под или над авто, способствуя прохождению большей части воздуха именно над машиной, что в свою очередь создаёт разницу давлений (сверху больше, а снизу меньше), из-за которой на передние колёса действует больше прижимной силы, что уравнивает прижимную силу спереди и сзади болида, так как иначе он бы начинал взлетать на большой скорости.

Существуют и другие аэродинамические элементы кузова, которые сильно влияют на аэродинамику. Канарды (элероны или направляющие щитки) — это боковые, плоские, клинообразные, заугольные вверх в сторону задней части автомобиля накладки на бампер, направляющие поступающий воздух вверх, что опять же создаёт разницу давлений. Служат для более точной настройки баланса между передними и задними колёсами, пускают воздух в обход них. Также под автомобилем есть множество конструкций, механических

узлов и систем автомобиля, которые в свою очередь создают турбулентность — явление, при котором воздушные массы движутся хаотично и непредсказуемо. Для этого придумали андертрей («undertray» — поддон), который закрывает все эти сплетения инженерной мысли и превращает дно автомобиля в ровную гладкую поверхность, убирая турбулентность и сопротивление воздуха снизу, а также увеличивая прижимную силу. Чаще всего андертрей используется вместе с диффузором (накладкой сзади), который создаёт постепенное увеличение пространства сзади, создавая эффект Вентури (это явление, при котором скорость жидкости увеличивается, а давление уменьшается, когда она течёт через суженную часть трубы или воздуховода. [6]), благодаря чему воздух снизу движется быстрее, что в свою очередь означает ещё большее понижение давления, а в следствии чего больше и прижимной силы. Это можно назвать эффектом «пылесоса», когда авто «присасывается» к дороге. В итоге мы имеем зону низкого давления снизу и зону высоко давления сверху, но воздух сверху стремится вниз к — зоне низкого давления. Для этого нужны пороги по бокам машины, они препятствуют попаданию воздуха высокого давления в зону низкого. [7]

2. Скорость, управление или всё вместе?

Какую конфигурацию использовать для достижения максимальной скорости или манёвренности, и что делать если нужно и то, и то? Давайте разберёмся, на что влияет каждый какой элемент.

Скорость. Для достижения максимальной скорости нужно уменьшить лобовое сопротивление воздуха и сделать так, чтобы автомобиль как можно эффективнее прорезал воздушное пространство. Таким образом, конфигурация для скорости будет выглядеть так: задний спойлер с минимальным углом атаки (наклон антикрыла относительно дороги), лучше всего если он будет параллелен плоскости движения; переднее крыло должно иметь максимальную обтекаемость с минимальным количеством закрылков; диффузор сзади должен иметь минимальный угол расширения, чтобы не создавать лишнего сопротивления. Как итог мы получаем максимальную скорость по прямой, но маленькую скорость прохождения поворотов.

Манёвренность. Чтобы автомобиль лучше проходил искривления дороги и как держался на ней как можно устойчивее нужно: поставить максимальный угол атаки на заднем антикрыле; мощный диффузор с глубокими туннелями вместе с андертреем, для максимизации прижимной силы. С такой конфигурацией у автомобиля будет мощная прижимная сила, плотно удерживающая его на дороге, позволяя агрессивнее маневрировать, но из-за большого сопротивления воздуха спереди, будет не такой быстрой на прямых участках.

Универсальность. Компромиссный вариант будет состоять из динамичного заднего спойлера (DRS), который будет уменьшать угол атаки на прямых участках и увеличивать угол на поворотах обеспечивая их быстрое и безопасное прохождение. Такая система сейчас используется на болидах Формулы 1. Также нам нужно выбрать оптимальный вариант диффузора, найдя его оптимальные размеры, где прижимная сила и сопротивления будут относительно

сбалансированными. На гражданских автомобилях важно смещать давление немного назад для большей устойчивости авто (во избежание заноса и лучшего поведения при торможении).

3. По какому алгоритму действовать для выбора конфигурации?

Для ответа на данный вопрос я предлагаю свою методику оценки важности различных условий маршрута, включающая в себя различные входные данные. Алгоритм поможет понять, что имеет больший приоритет в поездке.

Параметр	Обозначение	Шкала оценки	Вопрос
Доля скоростных участков	Скорость	1–5	Какой процент маршрута составляют прямые участки более 100 км/ч?
Доля извилистых участков	Извилистость	1–5	Насколько много на маршруте поворотов и манёвров?
Приоритет экономии топлива	Экономия	1–5	Насколько важна топливная эффективность?
Приоритет управляемости	Управляемость	1–5	Насколько важна стабильность и предсказуемость?
Тип дорожного покрытия	Дорога	1–5	Насколько качественно покрытие? (1=грунт, 5=идеальный асфальт)

$$\text{ПУ-(приоритет управляемости)} = \frac{\text{Извилистость} \cdot 0,4 + \text{Управляемость} \cdot 0,3 + \text{Дорога} \cdot 0,3}{5}$$

$$\text{ПС-(приоритет скорости)} = \frac{\text{Скорость} \cdot 0,4 + \text{Экономичность} \cdot 0,3 + \text{Дорога} \cdot 0,3}{5}$$

Пример расчёта:

Условие: поездка межгород.

$$\text{ПУ} = \frac{2 \cdot 0,4 + 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,3}{5} = 0,58$$

$$\text{ПС} = \frac{5 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,3}{5} = 0,88$$

0,58 < 0,88 значит в приоритете конфигурация для максимальной скорости.

4. Потенциальная польза экологии.

Автомобилю для поездки нужно топливо, то есть энергия для работы двигателя, если мы делаем его работу легче — уменьшая сопротивление

воздуха при набирании и поддержании скорости, то двигатель тратит меньше топлива, так как на него поступает меньше нагрузки. Замедление перед входом в поворот и последующее ускорение на выходе из него также заставляет двигатель работать больше, так как на поддержание уже набранной скорости уходит меньше энергии, чем на разгон, получается, что если у нас будет более высокая скорость в повороте, то меньше скорости надо будет набирать на выходе — меньше нагрузки — меньше сжигаемого и выбрасываемого топлива. Какую конфигурацию ни выбери, для скорости или управляемости, влияние аэродинамики на расход топлива остаётся, что в свою очередь означает, что при использовании аэродинамики выбросы сжигаемого топлива будут уменьшаться, а значит положительно влиять на экологию. Тесты в стандартизированном цикле WLTP («Всемирная гармонизированная методика испытаний для легковых автомобилей») показали, что автомобиль с показателем $C_d = 0,32$ расходует 7,6 л на 100 км, а у автомобиля с $C_d = 0,25$ расход — 6,8 л на 100 км. Экономия составила 10,5% в смешанном цикле и достигала 15% при движении по трассе со скоростью 120 км/ч. При годовом пробеге 30 000 км разница в потреблении топлива превышает 240 литров. [8]

5. Заключение

В ходе выполнения научной работы была достигнута поставленная цель: проанализировано влияние аэродинамики кузова на примере конструкций из автоспорта на скоростные характеристики и управляемость автомобиля, а также разработаны оптимальные конфигурации для различных условий эксплуатации.

Разработаны и обоснованы три варианта аэродинамической настройки: «Скорость»: минимизация расхода топлива и увеличения запаса хода; «Управляемость»: максимизация прохождения скоростных поворотов; «Универсальность»: компромиссный вариант, обеспечивающий баланс характеристик.

Также разработан алгоритм принятия оптимальной аэродинамической конфигурации на основе входных данных об условиях эксплуатации.

И в заключении показано, что оптимизация аэродинамики является одним из наиболее доступных способов снижения расхода топлива и выбросов CO_2 без изменения силовой установки, что ещё раз показывает важность аэродинамики. Для гражданских автомобилей внедрение элементов с низким сопротивлением может дать экономический и экологический эффект, сопоставимый с улучшением двигателя.

Исследование демонстрирует, что грамотная адаптация аэродинамических технологий из автоспорта позволяет создать автомобиль, который сочетает в себе высокую энергоэффективность, предсказуемую управляемость и повышенный уровень активной безопасности, что соответствует современным трендам развития автомобильной промышленности.

Список литературы:

1. Демонова, Т.В. Основы аэродинамики и гидромеханики : учебное пособие / Т.В. Демонова, В.П. Медведев. – Таганрог : ТАВИАК, 2011. – 7 с. – Текст : электронный.
2. Формула сопротивления воздуха: теория и практика» //fb.ru: [сайт]. – URL:<https://fb.ru/article/506770/2023-formula-soprotivleniya-vozduha-teoriya-i-praktika> (дата обращения: 27.03.2026). – Текст: электронный.
3. «Коэффициент аэродинамического сопротивления» // inner.su: [сайт]. – URL:<https://inner.su/services/koeffitsient-aerodinamicheskogo-soprotivleniya/> (дата обращения: 27.03.2026). – Текст: электронный.
4. Аэродинамика : учебник для вузов / А. Г. Голубев [и др.] ; под ред. В. Т. Калугина. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 216-235 с. — Текст : электронный.
5. [Donut]. [Wings and Spoilers; Lift and Drag | How It Works] [https://vk.com/video-226613946_456241715] – дата обращения: 28.03.2026). – Текст: визуальный.
6. Аэродинамика : учебник для вузов / А. Г. Голубев [и др.] ; под ред. В. Т. Калугина. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 70 с. — Текст : электронный.
7. [Donut]. [Side Skirts, Diffusers, and Air Dams | How It Works | Science Garage] [https://vk.com/video-226613946_456241761] – дата обращения: 30.03.2026). – Текст: визуальный.
8. «250 кг невидимого сопротивления: как аэродинамика автомобиля влияет на каждый километр пути» // www.ixbt.com: [сайт]. – URL :<https://www.ixbt.com/live/car/250-kg-nevidimogo-soprotivleniya-kak-aerodinamika-avtomobilya-vliyaet-na-kazhdyy-kilometr-puti.html> (дата обращения: 30.03.2026). – Текст: электронный.