

УДК 629.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ АЭРОДИНАМИКИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ

Михаил Сергеевич Колдин

кандидат технических наук, доцент

koldinms@yandex.ru

Андрей Алексеевич Хохлов

студент

garlic12@gmail.com

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Исследование аэродинамических свойств автомобиля берет свое начало с авиастроения и учений Циолковского К.Э. и Жуковского Н.Е. Рост мощностей автомобилей положил начало применению законов аэродинамики в транспортной инфраструктуре. В статье проводится анализ сил, действующих на автомобиль при движении на высокой скорости на примере уравнения Бернулли. Рассмотрены и обоснованы конструктивные исполнения, применяемые в современных автомобилях.

Ключевые слова: аэродинамика, автомобиль, поток воздуха, давление, прижимная сила, антикрыло, спойлер, сплиттер, кузов, уравнение Бернулли, эффект Анри Коанда.

С развитием автомобилестроения внимание аэродинамическим свойствам стало уделяться значительно больше. На самых ранних этапах в разработках наземного транспорта законы аэродинамики были не первостепенными. Транспорт прошлого века не развивал высоких скоростей, в отличие от современных автомобилей, где скорость движения может достигать до 450-500 км/ч. В то время конструкции кузовных частей автомобиля делали угловатыми, выпуклыми или торпедообразными. Первый складной автомобиль прошлого века, развивавший скорость до 50 км/ч, был спроектирован немецким инженером Энгельбертом Зашкой (рисунок 1) [1, 5].

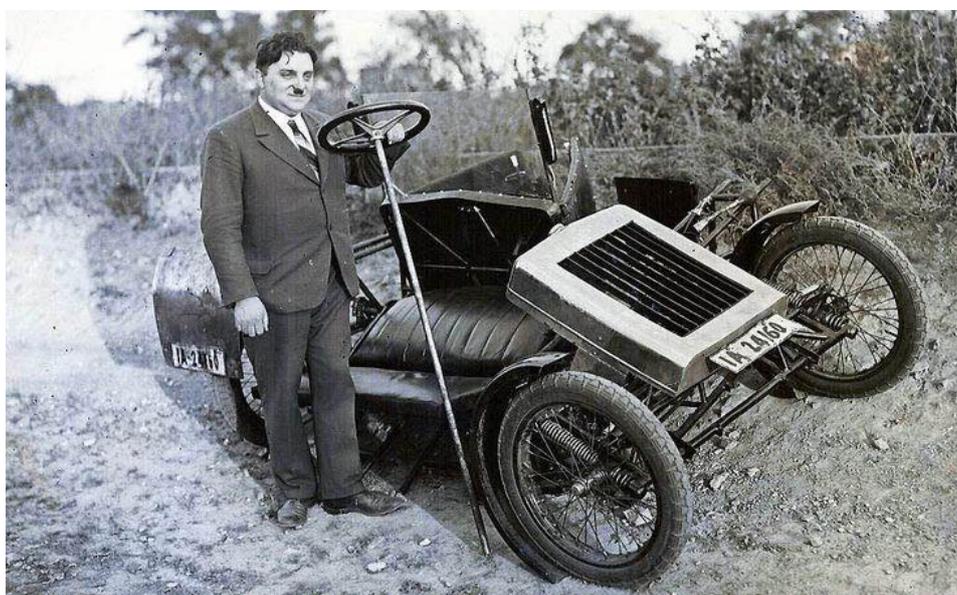


Рисунок 1 – Первый складывающийся автомобиль 1929 года.

Первые учения об аэродинамике были изложены в трудах русских ученых: Константина Эдуардовича Циолковского в работе «К вопросу о летании посредством крыльев» (1891) и Николая Егоровича Жуковского в труде «К теории летания» (1891), и использовались в авиастроении.

Само понятие аэродинамики дословно означает – взаимодействие воздуха с другими объектами, препятствиями и движущимися телами. Казалось бы, как воздух может оказать какое-то сопротивление на автомобиль, но практика автомобилестроения доказывает обратное, что воздух сильно замедляет движущиеся авто.

Сегодня коэффициент сопротивления у современных автомобилей варьируется в диапазоне от 0,25 до 0,35. Например, наиболее обтекаемым

кроссовером среди всех серийных автомобилей на текущий момент считается Tesla Model X с коэффициентом обтекаемости 0,24. Коэффициент сопротивления можно посчитать для абсолютно любой вещи, для этого достаточно перемножить его коэффициент сопротивления на фронтальную площадь предмета. Данное уравнение получило название лобового сопротивления [2, 9].

Стоит отметить, что в ситуации, когда 2 машины движутся с одинаковой скоростью, большее лобовое сопротивление будет у того автомобиля, который имеет большие габаритные размеры, даже при условии высоких аэродинамических свойств. Например, в сравнении Porsche 911 и Tesla Model X, у Porsche коэффициент сопротивления 0,33 и фронтальная площадь $2,4\text{ м}^2$, соответственно, лобовое сопротивление составляет 0,792, а у Tesla, при его самом низком коэффициенте сопротивления 0,24, лобовое сопротивление равняется 0,811.

В данной ситуации можно привести пример болидов Формулы-1. Казалось бы коэффициент сопротивления у гоночных машин должен быть максимально высоким вследствие обтекаемого корпуса. Однако, данный пример показывает обратное - коэффициент сопротивления у гоночных машин обычно равняется от 0,5 до 1. Развиваемые гоночными болидами высокие скорости приводят к сильной подъемной силе, которая стремится оторвать автомобиль от земли, что чревато крушением транспорта. Именно из этих соображений конструкторы стремятся повесить прижимную силу и сцепление колес с дорогой за счет трения.

Прижимная сила может быть как в отрицательном, так и в положительном контексте. В отрицательном плане прижимная сила снижает скорость движения автомобиля, но при этом повышает сцепление колес с дорогой и устойчивость машины во время движения. Также она дает прирост в крутящем моменте, так как колеса начнут буксовать гораздо позже. Обратной случаем будет низкая прижимная сила, это дает развитие более высоких

скоростей, при меньшем сцеплении с дорогой, что опасно переворачиванием автомобиля [1, 3, 6].

В дополнение к увеличению прижимной силы повышается курсовая устойчивость автомобиля или, как его называют, система динамической стабилизации. Система динамической стабилизации устроена на считывании действий водителя и определения отклонений движения от заданных параметров (легкая смена курса, движение без опрокидываний и заносов). При отклонении от желаемых параметров ситуация распознается как неконтролируемая и система начинает предпринимать меры, представленные на рисунке 2.

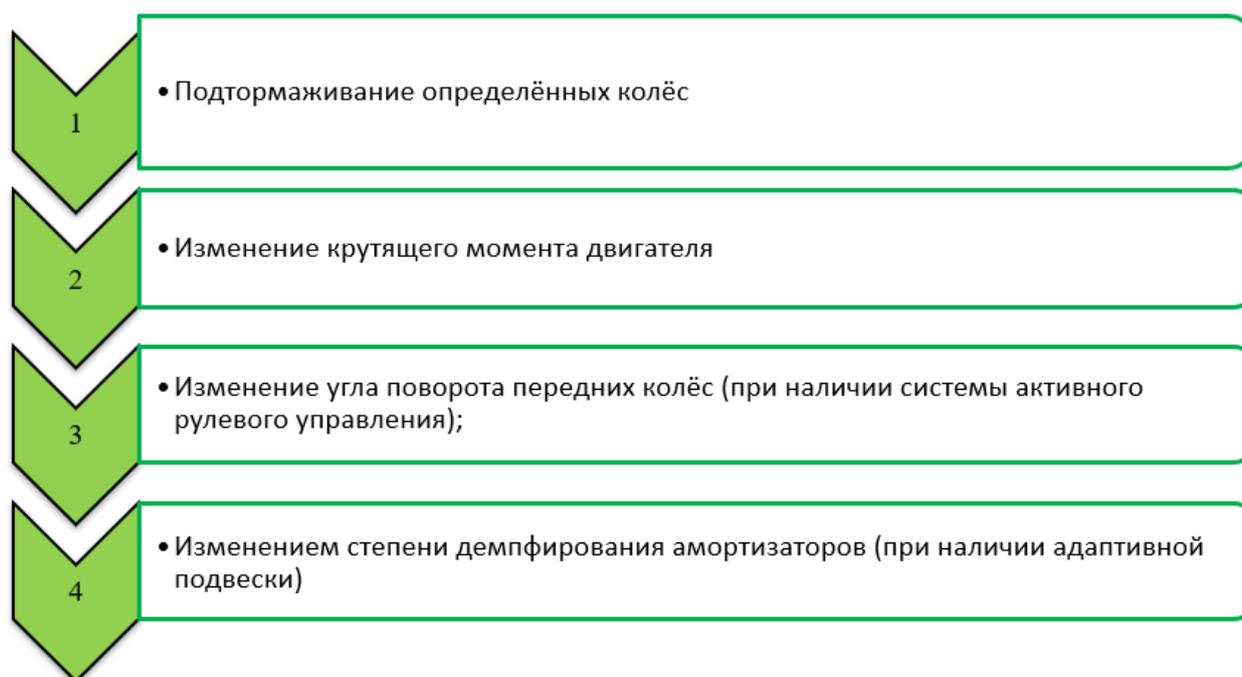


Рисунок 2 – Меры контроля системы динамической стабилизации.

Принцип работы прижимной силы основан на уравнении Бернулли.

Приведем наглядный пример. Возьмем трубку, центр которой сужен. Представим, что по трубе идет жидкость. На широком конце трубки идет высокое давление, но с низкой скоростью. Когда жидкость доходит до узкого участка трубки, казалось бы, давление должно возрасти, но оно падает, а скорость, наоборот, растет. В последствии, когда жидкость пройдет по узкому участку она снова попадет в широкий участок трубы и давление снова станет высоким, а скорость снизится (рисунок 3) [3, 6].

Уравнение гласит: если скорость потока воздуха над крылом больше скорости потока воздуха под крылом, то согласно уравнению Бернулли это соответствует перепаду давлений [4, 6].

$$\Delta p = p_2 - p_1.$$

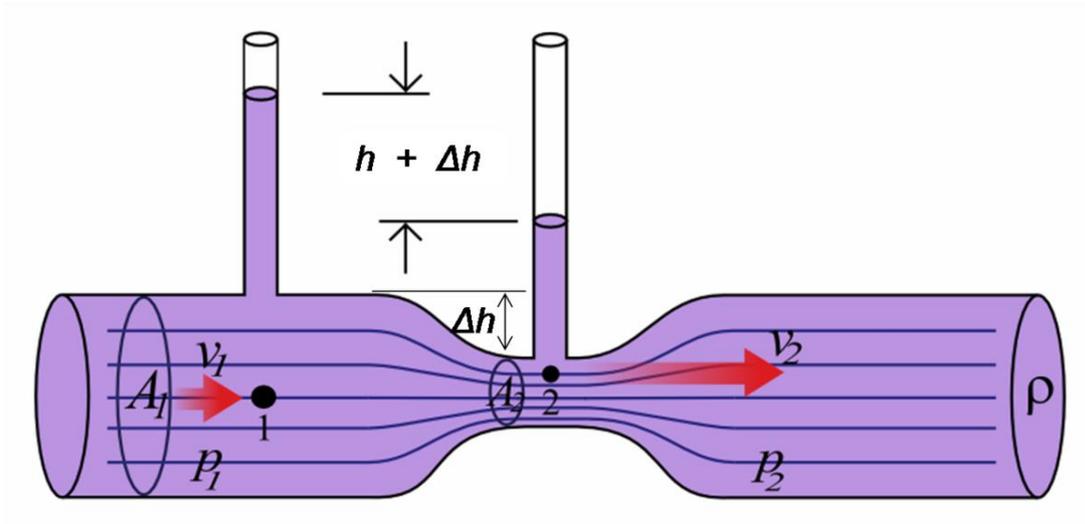


Рисунок 3 – Трубка Бернулли.

По принципу уравнения Бернулли работает крыло самолета. Снизу крыло имеет более плоскую форму чем сверху, таким образом достигается разность давлений и подъемная сила. Поток воздуха, проходящий под крылом имеет скорость ниже, чем скорость воздуха над крылом. Согласно уравнению Бернулли, где выше скорость жидкости или как в нашем случае воздуха, тем меньше давления он оказывает на поверхность. Поток воздуха сверху стремится воссоединиться с воздухом снизу и создает область низкого давления, а снизу формируется область высокого давления, вследствие медленного течения воздуха, что обеспечивает подъем самолета [4, 6].

Отметим, что на подъемную силу самолета влияет угол атаки крыла, чем больше угол атаки, тем выше подъемная сила. Стоит учесть, что угол атаки не безразмерная величина и при превышении угла в 9° приводит к сильным завихрениям.

У антикрыла автомобиля прямо противоположная ситуация. Крыло имеет обратную форму, за что и получило свое название. Поток воздуха проходящие снизу создают область низкого давления, а движение потоков воздуха сверху наоборот формируют область высокого давления, таким образом достигается

прижимная сила. У болидов Формулы-1 антикрылья имеют большие размеры это нужно для отвода сильных воздушных потоков, создаваемых большими радиусами колес (рисунок 4) [5].

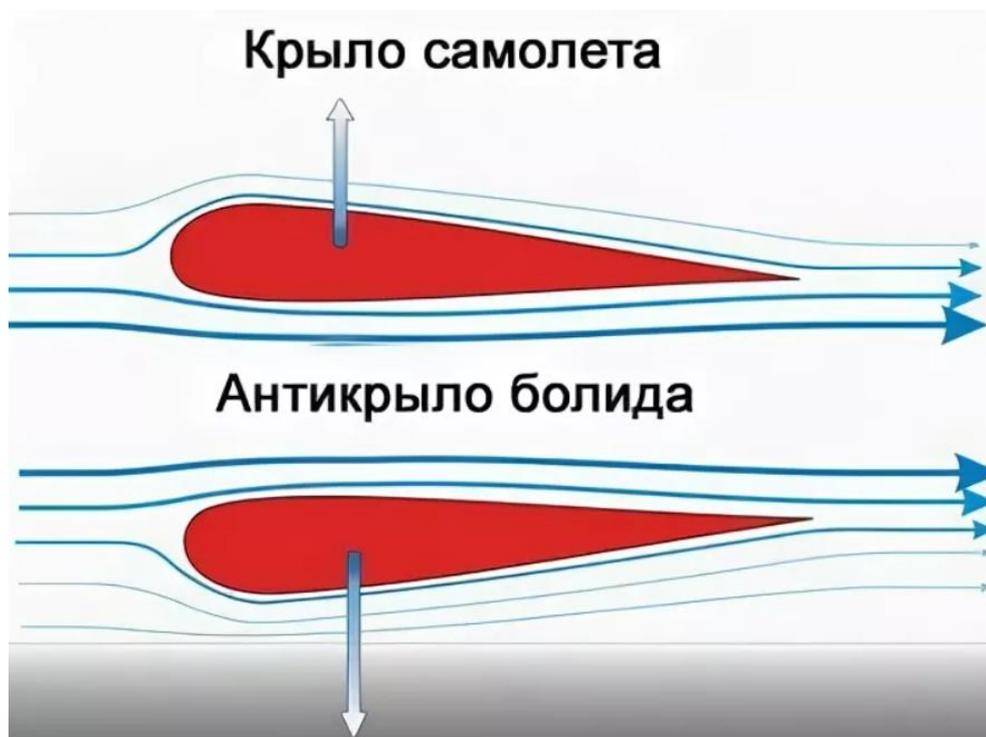


Рисунок 4 – Сравнение крыла и антикрыла.

Стремление жидкости или воздуха двигаться в направлении поверхности обусловлено эффектом Анри Коанда – румынский ученый, открывший этот закон в 1932 году.

Спойлер от английского «to spoil» переводится как мешать или портить. В некоторых ситуациях, например, для Porsche 911, когда модель кузова автомобиля имеет плавный скат с крыши, тем самым создавая быстрый и плавный поток воздуха, образуется зона с низким давлением. Вследствие чего задняя часть автомобиля, которая и так имеет меньшую прижимную силу, чем передняя часть, начинает приподниматься от потоков воздуха с высоким давлением. Для разряжения низкого давления на заднюю часть автомобиля устанавливают спойлер. Его основная задача строиться на небольшом препятствии потоку воздуха, понижая завихрения в задней части автомобиля. Благодаря снижению завихрений понижается коэффициент аэродинамического сопротивления, что положительно сказывается на расходе топлива. При этом спойлер не оказывает дополнительную прижимную силу, он лишь уменьшает

подъемную и добавляет стабильности управления на дороге (рисунок 5) [9, 10, 11].

Важно отметить, что спойлер и антикрыло имеют совершенно разное конструктивное и эксплуатационное назначение.

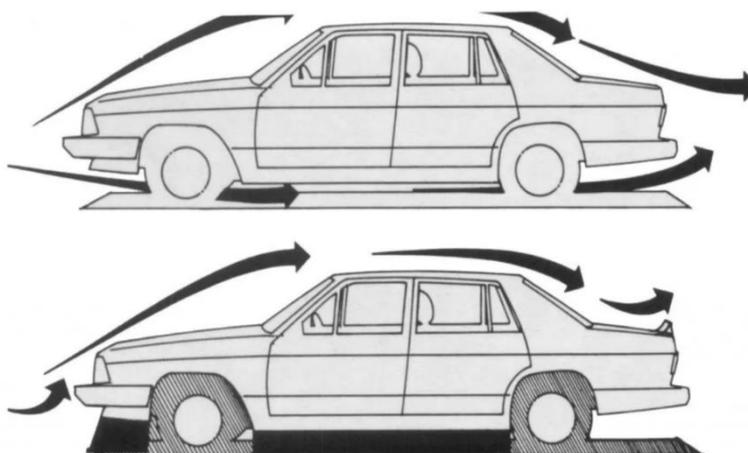


Рисунок 5 – Конструкция спойлера.

Баланс между аэродинамическими свойствами, прижимной и подъемной силой играет важную роль в управляемости и поворачиваемости автомобиля. Если поставить массивное антикрыло на заднеприводный автомобиль, то это может привести к повышенной поворачиваемости, что приводит к неконтрольному управлению. На переднеприводных машинах, установленное сзади антикрыло играет в положительном ключе, позволяя повысить стабильность на поворотах [1, 6].

Если сзади машины устанавливают антикрыло для увеличения прижимной силы, то для ее увеличения в передней части авто используют «сплиттер» от английского split – разделять (рисунок 6).



Рисунок 6 – Устройство «сплиттера».

Как понятно из названия, его основное предназначение в «разделении» потоков воздуха или его направления. Перед тем как поток воздуха столкнётся с машиной, проходя сверху и снизу по кузову авто, он будет иметь зону высокого давления. Если большая часть воздуха попадет под кузов автомобиля, то он может перевернуться. Для того, чтобы воздух с низким давлением проходил под машиной, а с высоким давлением над ней, устанавливают сплиттер. Воздушный поток сталкиваясь со сплиттером отводится по бокам колесных арок или направляется по вентиляционным отверстиям в бампере к внутренней части автомобиля, охлаждая тормоза, двигатель и другие детали. Когда воздух проходит под автомобилем он вынужден ускориться, создавая область низкого давления и прижимая автомобиль к земле. Плюсом ко всему прохождение большей части воздуха сверху дает дополнительную прижимную силу [1, 6, 8].

Стоит отметить, что установка спойлеров, сплиттеров, антикрыльев для езды в повседневной жизни является лишь предметом роскоши. Аэродинамическое сопротивление на низких скоростях имеет незначительные показатели. Но при росте скорости прижимная сила увеличивается экспоненциально с увеличением скорости, и вместе с ним сопротивление, пропорционально квадрату скорости. Это условие следует из законов аэродинамики и описанного выше уравнения Бернулли (рисунок 7) [3, 8].

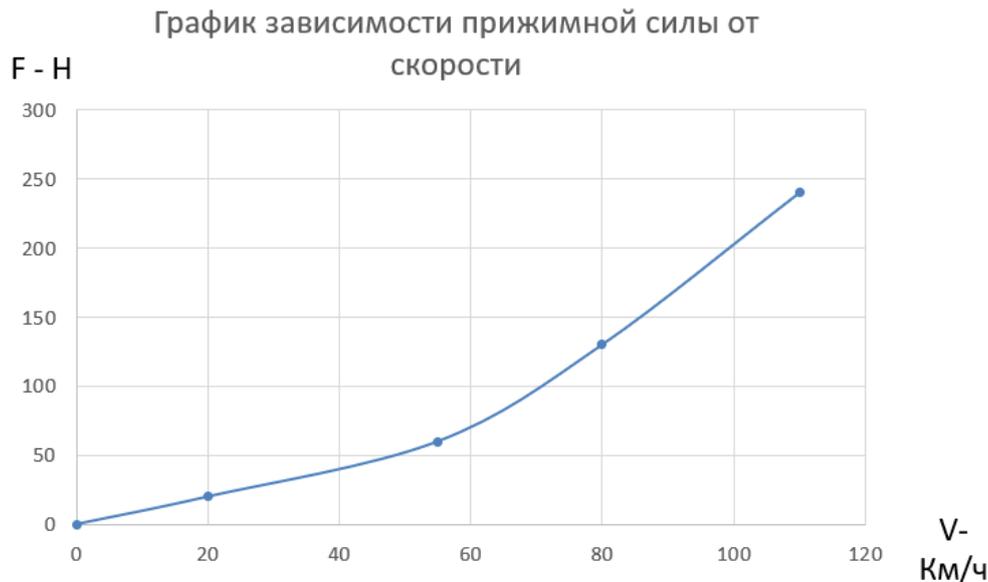


Рисунок 7 - График теоретической зависимости прижимной силы от скорости.

Прижимная сила выражается следующим образом:

$$F = CL * \rho * V^2 * A,$$

где F - прижимная сила (Н), CL - коэффициент подъёмной силы, ρ - плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$), v - скорость (м/с), A - площадь крыла (м^2).

Список литературы:

1. Алифанов А.А. Аэродинамика автомобилей. Арктический исследователь. 2024. № 1. С. 8-10.
2. Костин М.М., Колдин М.С. Система автоматизированного проектирования в автомобилестроении // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, Мичуринск-наукоград, 26-28 октября 2022 года. Под общей редакцией И.П. Криволапова. Мичуринский государственный аграрный университет. 2022. С. 123-127. EDN: ICROZF6.
3. Колдин М.С., Алехин А.В., А.А. Земляной, А.В. Аксеновский. Гидравлика. Мичуринск. Изд-во «Инфра-Инженерия». 2025. С. 45-48.
4. Верещиков Д.В., Салтыков С.Н. Самолет Ил-76: аэродинамика и динамика полета. Электрон. 2006. С. 65.

5. Симахин Д.А., Войнов А. А. Краткая рекомендация по созданию обтекаемой формы автомобиля // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сборник статей IX Всероссийской научно-производственной конференции / МНИЦ ПГСХА; Под общей редакцией В. В. Салмина. Пенза. 2015. С. 76-80.
6. Жуковский Н.Е. Аналитическая механика. Теория регулирования хода машин. Прикладная механика / Под редакцией В. П. Ветчинкина, Н. Г. Чеботарева // Москва. Издательство Юрайт. 2025. С. 462.
7. Бернацкий В.В., Степанов И.С., Кондрашов В.Н. Аэродинамика автомобиля. Методы испытаний: учебное пособие // М.: Университет машиностроения (МАМИ). 2013. С. 153.
8. Хайруллаев Т.А., Алматова Г.К. Аэродинамические характеристики автомобиля // Машиностроение: новые концепции и технологии: Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск. 28 октября 2022 года. Красноярск. 2022. С. 142-146.
9. Кузнецов В.А. Гидргазодинамика: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва. Издательство Юрайт. 2025. С. 120.
10. Манаенков К.А., Колдин М.С. Подготовка инженерных кадров для реализации программ научно-технического развития АПК // Интеллектуальные технологии и техника в АПК. Материалы международной научно-практической конференции 18-20 октября 2016 г. Мичуринск: Изд-во "БИС". 2016. С. 26-37. EDN: YNWPFB
11. Хубаева А.Е., Бородкина С.В., Колдин М.С. Применение CAD-систем при проектировании деталей машин на примере пакета КОМПАС-3D // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 2. EDN: ZSZRGL

UDC 629.31

**RESEARCH OF AERODYNAMICS APPROACHES IN THE DESIGN
OF AUTOMOTIVE STRUCTURES**

Andrey A. Khokhlov

student

garlic12@gmail.com

Mikhail S. Koldin

candidate of technical sciences, associate professor

koldinms@yandex.ru

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Annotation. The study of the aerodynamic properties of a car originates from aircraft construction and the teachings of Tsiolkovsky K.E. and Zhukovsky N.E. The growth of car capacity marked the beginning of the application of the laws of aerodynamics in transport infrastructure. The article analyzes the forces acting on a car when driving at high speed using the example of the Bernoulli equation. The constructive designs used in modern cars are considered and justified.

Keywords: aerodynamics, car, air flow, pressure, downforce, wing, spoiler, splitter, body, Bernoulli equation, Henri Coand effect.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 10.05.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.