

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»

(наименование)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Проектирование и эксплуатация силовых установок для автомобилей специального назначения

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Разработка методики оценки влияния фактического профиля аэродинамического обвеса на фактическое значение динамических показателей спортивно-гоночного шасси»

Обучающийся

А.О. Нуянзин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

канд. техн. наук, доцент А. С. Тизиров

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение	3
1 Состояние вопроса	5
1.1 Правила регламента соревнований «Формула Студент» касательно конструкции аэродинамических элементов болида	5
1.2 Анализ конструкций аэродинамических элементов болидов класса «Формула Студент»	11
2 Теоретические аспекты, необходимые при разработке автомобильной аэродинамики	24
3 Разработка эффективных аэродинамических элементов для гоночного болида класса «Формула Студент»	55
3.1 Обзор автомобиля. Определение входных данных.....	55
3.2 Разработка концепции аэродинамических элементов	57
4 Валидация эффективности концепции аэродинамического обвеса для болида класса «Формула Студент»	61
4.1 Описание ПО «АНСИС»	61
4.2 Проведение симуляций для определения эффективности работы аэродинамического обвеса.....	66
Заключение	75
Список используемых источников.....	76

Введение

«Формула Студент» представляет собой значимый шаг в подготовке инженерных специалистов, соответствующий современным требованиям рынка труда и образовательным стандартам. В условиях быстрого технологического прогресса и постоянного обновления знаний, необходимых для успешной профессиональной деятельности, данный проект акцентирует внимание на практической подготовке студентов, что является ключевым аспектом в инженерном образовании.

Основное преимущество проекта, это возможность объединять теоретические знания с практическими навыками. Участие студентов в проекте позволяет им не только углубить свои знания в области инженерии, но и развить критически важные компетенции, такие как командная работа, управление проектами и решение нестандартных задач. Эти навыки становятся все более востребованными на рынке труда, где работодатели ищут специалистов, способных адаптироваться к быстро меняющимся условиям и эффективно работать в команде.

«Формула Студент» способствует развитию инновационного мышления у будущих инженеров. Проект предоставляет студентам возможность работать над реальными задачами и проектами, что стимулирует их к поиску нестандартных решений и внедрению новых идей. Это особенно важно в контексте глобальных вызовов, таких как устойчивое развитие и цифровизация, где требуется креативный подход к решению сложных проблем.

Также стоит отметить, что проект «Формула Студент» способствует укреплению связей между образовательными учреждениями и промышленностью. Партнерство с компаниями позволяет студентам получать актуальную информацию о потребностях рынка труда и трендах в инженерной сфере. Это взаимодействие помогает формировать учебные

программы, которые соответствуют требованиям работодателей и обеспечивают выпускников необходимыми знаниями и навыками.

«Формула Студент» является актуальным инструментом подготовки высококвалифицированных инженерных кадров. Он не только улучшает качество образования, но и способствует формированию профессионалов, готовых к вызовам современного мира.

Цель данной работы заключается в том, чтобы оптимизировать, а также разработать концепцию аэродинамического обвеса для гоночного болида класса «Формула Студент»

Для того, чтобы достигнуть поставленной цели, был сформулирован ряд задач, который поможет в реализации основной цели:

- сделать глубокий анализ регламента соревнований «Формула Студент» для того, чтобы проводить любые оптимизации конструкций только в рамках существующих правил;

- для того, чтобы увеличить эффективность работы конструкции, а также избежать ошибок проектирования команд «Формула Студент», провести анализ существующих конструкций;

- сделать подробный обзор теоретических параметров и факторов, влияющих на эффективность работы аэродинамики автомобиля;

- сделать полный обзор гоночного автомобиля «Формула Студент» и определить все необходимые входные данные перед началом проектирования;

- разработать концепцию аэродинамического комплекта для болида класса «Формула Студент»;

- провести ряд симуляции для проверки эффективности разработанного обвеса, провести сравнение с предыдущими конструкциями;

- практическое применение.

1 Состояние вопроса

1.1 Правила регламента соревнований «Формула Студент» касательно конструкции аэродинамических элементов болида

Регламент соревнований «Формула Студент» – это важный документ, который определяет правила, условия и требования к участникам, а также порядок проведения соревнований. Он служит основой для организации и проведения мероприятий, обеспечивая справедливость и прозрачность в оценке результатов команд. Регламент необходим для того, чтобы все участники имели равные условия для участия, понимали критерии оценки и могли заранее подготовиться к соревнованиям.

В регламенте «Формула Студент» обычно выделяются несколько ключевых разделов. Во-первых, это общие положения, в которых описываются цели и задачи соревнований, а также основные принципы их проведения. Здесь же могут быть указаны сроки регистрации команд, требования к участникам и информация о месте проведения.

Во-вторых, регламент включает разделы, касающиеся технических требований к автомобилям. В этом разделе подробно описываются параметры конструкции автомобилей, такие как размеры, вес, типы используемых материалов и компоненты. Указаны также требования к безопасности – например, наличие защитных систем и оборудования для обеспечения безопасности водителей.

Третий важный раздел касается процесса оценки и судейства. В нем описываются критерии оценки работы команд в различных дисциплинах соревнований – от проектирования автомобиля до его тестирования на трассе. Указываются методы подсчета баллов и порядок определения победителей. Это может включать как технические испытания на треке, так и презентации проектов перед жюри.

Кроме того, регламент может содержать разделы о правилах поведения участников во время соревнований. Здесь прописаны нормы этики и профессионализма, которые должны соблюдать команды и их члены. Это важно для создания позитивной атмосферы на мероприятии и поддержания духа честной конкуренции.

Также в регламенте указаны дополнительные аспекты, такие как правила по использованию спонсорских материалов или логотипов на автомобилях и униформе участников. Это помогает сохранить целостность бренда соревнований и обеспечивает соответствие требованиям спонсоров.

Стоит отметить, что регламент соревнований «Формула Студент» является важным инструментом для организации успешного мероприятия. Он не только устанавливает четкие правила игры для всех участников, но и способствует развитию инженерных навыков у студентов через практическое применение теоретических знаний в условиях реальной конкуренции. Таким образом, регламент обеспечивает высокие стандарты качества как в подготовке команд, так и в проведении самих соревнований.

Регламент соревнований «Формула Студент» состоит из нескольких ключевых разделов, каждый из которых играет важную роль в организации и проведении мероприятия. Эти разделы охватывают различные аспекты, от общих положений до технических требований, и каждый из них имеет свое значение для проектирования конструкций болида.

Первый раздел – это общие положения, в котором изложены цели и задачи соревнований, а также основные принципы их проведения. Этот раздел помогает участникам понять философию соревнований и их значимость для развития инженерных навыков. Он также включает информацию о сроках регистрации, правилах участия и условиях для команд.

Второй важный раздел – технические требования к автомобилям. Этот раздел является одним из самых критичных для проектирования болида, так как он содержит детальные спецификации по конструкции, материалам и компонентам. Здесь прописаны ограничения по размерам, весу, типам

используемых двигателей и трансмиссий, а также требования к системам безопасности. Например, регламент может указывать минимальные стандарты прочности шасси или обязательные элементы безопасности, такие как каркас безопасности и системы защиты водителя. Соблюдение этих требований критически важно для обеспечения безопасности участников и успешного прохождения технической инспекции.

Третий раздел касается процесса оценки и судейства. В нем описываются критерии оценки работы команд в различных дисциплинах соревнований – от проектирования до тестирования на трассе. Этот раздел важен для понимания того, какие аспекты конструкции болида будут оцениваться жюри. Например, могут быть указаны критерии по аэродинамике, эффективности использования топлива или инновационным решениям в конструкции. Знание этих критериев позволяет командам сосредоточиться на наиболее важных элементах при разработке своего автомобиля.

Четвертый раздел посвящен правилам поведения участников во время соревнований. Хотя этот аспект не связан напрямую с проектированием болида, он важен для создания позитивной атмосферы на мероприятии и поддержания духа честной конкуренции. Участники должны понимать нормы этики и профессионализма, которые они обязаны соблюдать.

Регламент соревнований «Формула Студент» включает в себя множество важных разделов, каждый из которых играет свою роль в процессе подготовки команд и проектирования автомобилей. Особенно критичными являются технические требования к автомобилям и критерии оценки работы команд, так как они напрямую влияют на конструкцию болида и его соответствие стандартам безопасности и эффективности. «Понимание всех аспектов регламента позволяет командам успешно разрабатывать свои проекты и добиваться высоких результатов на соревнованиях.

В регламенте соревнований «Формула Студент» относительно аэродинамических элементов присутствует данная информация:

Т 2.1.3 Автомобили с открытыми колесами должны соответствовать. Колеса/шины не должны ничем перекрываться, если смотреть сбоку. Ни одна из частей автомобиля не может входить в "свободную зону", определяющуюся двумя вертикальными линиями, проходящими на расстоянии 75 мм, считая спереди автомобиля и 75 мм, считая от конца внешнего диаметра передних и задних шин. Колеса в это время расположены прямо. Эта зона впоследствии будет проходить от внешней плоскости колеса/шины к внутренней плоскости колеса/шины.

На рисунке 1 можно увидеть свободную зону, о которой идет речь в регламенте» [27].

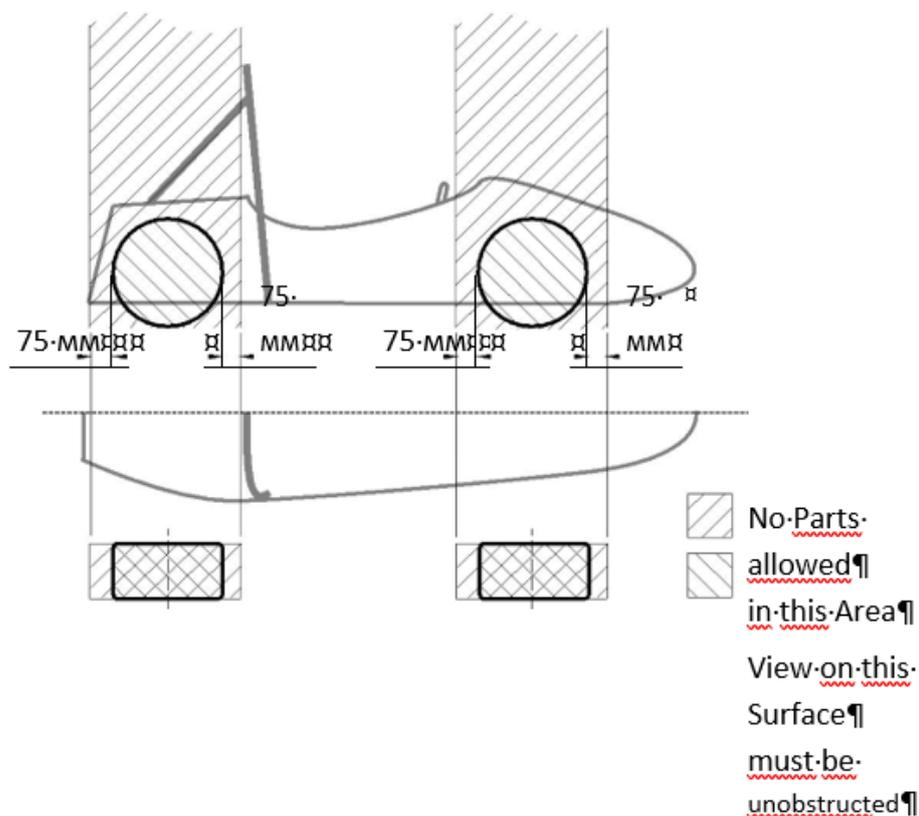


Рисунок 1 – Свободная зона открытых колес гоночного болида

Т 2.2.3 Все края, с которыми может контактировать человек (пешеход) должны иметь радиус не менее 1 мм. Кузов спереди передних колес (нос) должен иметь радиус как минимум 38 мм, проходящий под углом как минимум 45° относительно переднего направления, вдоль верхних, боковых и нижних задействованных краев.

Т 2.3.2 Минимальный дорожный просвет автомобиля в статическом положении с водителем внутри составляет 30 мм.

Т 8.1.1 Аэродинамическое устройство – это специально разработанная структура, крепящаяся к автомобилю для управления потоком воздуха вокруг машины, повышая прижимную силу или уменьшая ее сопротивление. «Крепление конструкции не является аэродинамическим устройством, если только оно не было спроектировано специально для этого.

Т 8.2.1 Эффекты заземления запрещены. Ни одно устройство питания не может быть использовано для перемещения или удаления воздуха из-под автомобиля

Т 8.2.2 Ограничения по высоте:

Все аэродинамические устройства, выходящие вперед за вертикальную плоскость, проходящую через самую отдаленную позицию передней поверхности защиты головы водителя (установленная в самую дальнюю позицию), исключая все наполняющие материалы, должны быть ниже 500 мм относительно земли.

Все аэродинамические устройства спереди передней оси и выходящие за пределы самой внутренней точки переднего колеса/шины, должны быть ниже 250 мм относительного дорожного просвета.

Все аэродинамические устройства, выходящие назад за вертикальную плоскость, проходящую через самую отдаленную позицию передней поверхности защиты головы водителя (установленная в самую дальнюю позицию), исключая все наполняющие материалы, должны быть ниже 1:2м относительно земли.

Т 8.2.3 Ограничения по ширине:

Все аэродинамические приспособления, расположенные ниже 500 мм относительно дорожного просвета и выходящие за переднюю ось, не должны быть шире, чем вертикальная плоскость, касающаяся внешней поверхности переднего и заднего колеса/шины.

Все аэродинамические устройства, находящиеся выше 500 мм относительно земли, не должны выходить за пределы внутренней точки заднего колеса

Т 8.2.3 Ограничения по длине:

Все аэродинамические приспособления не должны выходить более чем на 250 мм от самой задней части задних шин.

Все аэродинамические устройства не должны выходить более чем на 700 мм вперед, считая от переда передних шин

Т 8.3.4 Все ограничения должны быть выполнены с 4 колесами, стоящими по прямой и с какими-либо настройками подвески с водителем или без него.

Т 8.4.1 Все аэродинамические устройства, обращенные вперед, которые могут контактировать с пешеходом, должны иметь минимальный радиус в 5 мм для горизонтальных краев и 3 мм для вертикальных.

Т 8.5.1 Каждое аэродинамическое устройство должно выдерживать нагрузку в 200 Н, распределенной как минимум по поверхности в 225 см² и не отклоняться более чем на 10 мм в направлении распределения нагрузки.

Т 8.5.2 Любое аэродинамическое устройство должно выдерживать нагрузку в 50 Н, приложенное в точку в любом направлении и не отклоняться более чем на 25 мм.

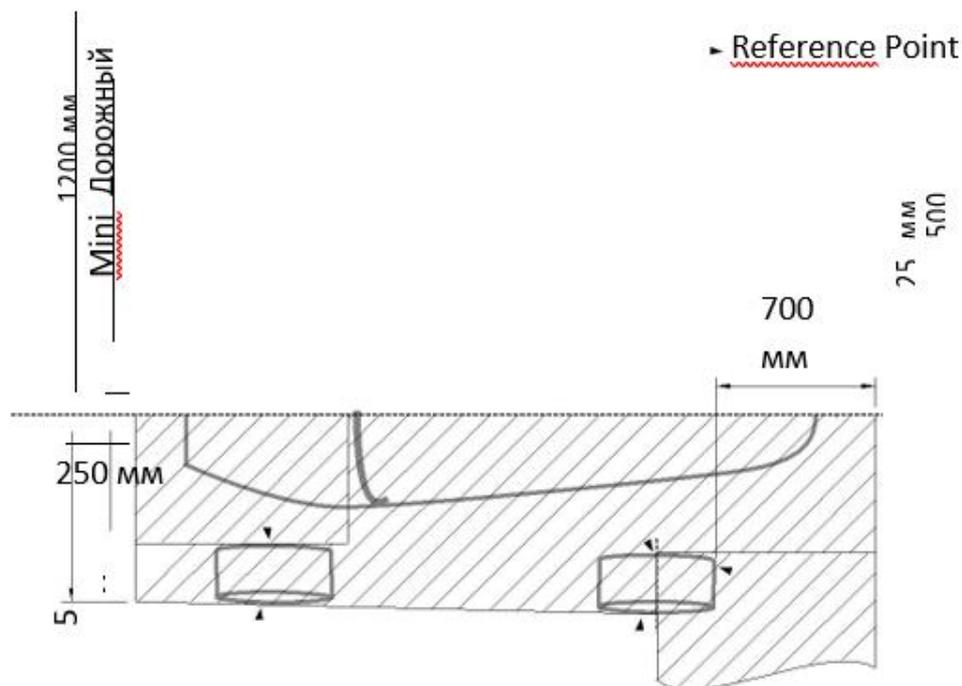


Рисунок 2 – Ограничения расположения аэродинамических элементов гоночного болида класса «Формула Студент»

На рисунке 2 можно увидеть ограничения расположения аэродинамических элементов» [2].

1.2 Анализ конструкций аэродинамических элементов болидов класса «Формула Студент»

Проведение сравнительного анализа конструкций конкурентов в рамках соревнований «Формула Студент» является важным и актуальным этапом подготовки команд, который позволяет не только почерпнуть полезные идеи, но и избежать повторения ошибок, допущенных другими участниками. В условиях высокой конкуренции, где каждая деталь может оказать значительное влияние на производительность автомобиля, такой анализ становится ключевым инструментом для достижения успеха [15].

Во-первых, сравнительный анализ позволяет командам изучить лучшие практики и инновационные решения, применяемые другими участниками. Изучая конструкции болидов конкурентов, команды могут выявить эффективные подходы к проектированию, использованию материалов и технологий. Это может касаться как аэродинамических форм, так и систем подвески или трансмиссии. Понимание того, какие решения оказались успешными у других команд, дает возможность адаптировать эти идеи к собственному проекту и улучшить его характеристики.

Во-вторых, анализ конструкций конкурентов помогает избежать распространенных ошибок и недочетов. Каждое соревнование «Формула Студент» предоставляет командам возможность учиться на опыте других. Изучая недостатки и проблемы, с которыми столкнулись соперники в процессе разработки или во время соревнований, команды могут заранее предусмотреть возможные риски и минимизировать их влияние на свой проект. Это особенно важно в контексте безопасности – понимание того, какие элементы конструкции могут быть уязвимыми или недостаточно прочными, позволяет разработать более надежные решения.

Кроме того, сравнительный анализ способствует развитию критического мышления и инновационного подхода у студентов. Оценка конструкций конкурентов требует глубокого понимания инженерных принципов и способности к анализу. Команды должны не только выявлять сильные и слабые стороны чужих решений, но и обосновывать свои выводы на основе фактических данных и результатов испытаний. Это развивает навыки анализа и синтеза информации, что является важным аспектом инженерного образования.

Также стоит отметить, что такой анализ может способствовать созданию здоровой конкурентной среды среди участников. Обмен знаниями и опытом между командами может привести к общему повышению уровня качества проектов в соревнованиях. Когда команды стремятся не только к победе над соперниками, но и к улучшению своих собственных решений на

основе анализа чужих работ, это создает атмосферу сотрудничества и взаимопомощи.

Проведение сравнительного анализа конструкций конкурентов является актуальным и важным процессом для команд «Формула Студент». Он позволяет извлекать полезные идеи из успешных решений других участников, избегать распространенных ошибок и развивать критическое мышление у студентов. Такой подход не только повышает шансы на успех в соревнованиях, но также способствует формированию высококвалифицированных специалистов с глубокими знаниями в области инженерии [29].

На рисунке 3 представлена конструкция аэродинамического обвеса обвеса одной из команд.



Рисунок 3 – Конструкция аэродинамического обвеса с неоптимальным аэродинамическим сопротивлением

На 3 рисунке можно увидеть гоночный автомобиль класса «Формула Студент» с неполным аэродинамическим комплектом. Мы можем увидеть, что автомобиль оснащен неполной обшивкой, а из аэродинамических элементов можно увидеть только переднюю защитную структуру или же нос автомобиля, а также боковые аэродинамические структуры.

Хотелось бы отметить, что оптимизирована аэродинамика данного болида не лучшим образом, вот по каким причинам:

- множество открытых структур, таких как моторный отсек, рамная конструкция, достаточно габаритная система впуска автомобиля, все это придает дополнительное аэродинамическое сопротивление;

- плоский, перпендикулярный направлению движения нос автомобиля, что в разы может увеличивать воздушное сопротивление для болида, потому что нос будет не рассекает потоки воздуха, а наоборот, потоки воздуха на большой скорости будут просто врезаться и придавать сопротивление о поверхность носовой структуры автомобиля;

- открытые боковые структуры. Действительно боковые аэродинамические элементы придают автомобилю прижимной силы за счет того, что образуют большую площадь под автомобилем и создают эффект «всасывания» за счет зоны низкого давления, однако если присмотреться, команда даже не подумала придать данным элементам аэродинамическую форму, за счет чего потоки воздуха будут врезаться в элементы системы охлаждения и в элементы выпускной системы автомобиля, спрятанные как раз за боковыми аэродинамическими структурами.

Все эти доводы могут позволить сделать определенные выводы, что данная конструкция аэродинамических структур не является эффективной, и более того, скорее всего может иметь негативный эффект.

На рисунке 4 можно увидеть конструкцию гоночного болида известной немецкой команды без аэродинамического комплекта.



Рисунок 4 – Конструкция гоночного болида известной немецкой команды без аэродинамического комплекта

На рисунке 4 можно увидеть гоночный болид класса «Формула Студент» известной немецкой команды, имеющей огромный опыт в автомобилестроении, а также множество титулов и наград за победы в соревнованиях.

Можно увидеть, что в данном сезоне, видимо, команда посчитала, что использование дополнительных аэродинамических элементов будет не рациональным и неэффективным. Дело в том, что иногда команды стремятся к снижению веса, да и, кроме того, скорости на гоночных треках соревнований «Формула Студент» редко достигают 80–100 км/ч.

В данном случае хочется отметить, что команда имеет обвес, полностью скрывающий остальные элементы автомобиля, что уменьшает аэродинамическое сопротивление, а также команда оснастила автомобиль достаточно аэродинамичной носовой конструкцией, что позволит команде разрезать потоки воздуха и иметь минимальное сопротивление.

Кроме того, хотелось бы отметить, что данная команда использует для своего болида класса «Формула Студент» 8-дюймовые колеса. За счет своего размера данные колеса имеют и малое фронтальное сопротивление воздушным потокам, и не имеют сильных воздушных завихрений, а также не имеют большого сопротивления качению, что в свою очередь также благоприятно влияет на аэродинамику данного автомобиля.

Однако хотелось бы отметить, что гоночные болиды данной команды в следующих сезонах обладали полным комплектом аэродинамики.

На рисунке 5 можно увидеть еще одну конструкцию гоночного болида.



Рисунок 5 – Конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродинамических боковых структур и аэродна

На 5 рисунке конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродинамических боковых структур и аэродна.

Хочется отметить, что команда имеет обвес, полностью скрывающий остальные элементы автомобиля, что уменьшает аэродинамическое сопротивление, а также команда оснастила автомобиль достаточно

аэродинамичной носовой конструкцией, что позволит команде разрезать потоки воздуха и иметь минимальное сопротивление. Более того, команда установила боковые аэродинамические структуры и аэродно.

Судя по конструкции, данный болид электрического класса, потому что у данной команды нет необходимости делать крупногабаритные боковые элементы для того, чтобы также скрыть элементы системы выпуска и системы охлаждения. В данном случае команда просто сделала боковые структуры частью аэродна для того, чтобы увеличить площадь под автомобилем для создания зоны низкого давления и добиться большего эффекта «всасывания» [28].

Есть несколько причин, по которой команда не использует большее количество аэродинамических элементов:

- недостаточное количество денежных средств у команды, что ограничивает закупочные и производственные возможности команды;

- недостаточное количество времени у команды. Так как каждая команда в соревнованиях «Формула Студент» должна каждый год строить новый автомобиль, то часто командам с малым количеством участников или же с малым опытом не хватает времени на производство всех запланированных структур автомобиля;

- команды провела большое количество симуляций и действительно поняла, что некоторые аэродинамические элементы не принесут желаемой эффективности. Например, в данном случае команда решила использовать только аэродно.

На 6 рисунке можно увидеть конструкцию гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродинамических боковых структур и только переднего антикрыла



Рисунок 6 – Конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродинамических боковых структур и только переднего антикрыла

В данном случае можно заметить, что помимо того, что команда имеет обвес, полностью скрывающий остальные элементы автомобиля, что уменьшает аэродинамическое сопротивление, а также команда оснастила автомобиль достаточно аэродинамичной носовой и боковой конструкцией, в данном случае команда также установила переднее антикрыло [22]. Кроме того, стоит заметить, что команда имеет достаточно габаритную заднюю структуру системы охлаждения, которая также увеличивает площадь нижней части автомобиля, что благоприятно влияет на прижимную силу, а именно на эффективность прижимной силы.

Стоит отметить, что команда установила только переднее антикрыло, и почему-то проигнорировала заднее. В данном случае видно, что команда достаточно опытная и имеет большое количество спонсоров, материальных возможностей и производственных возможностей. Учитывая, что совместно с габаритной системой охлаждения в задней части автомобиля, образуется достаточно большая площадь под автомобилем, что должно создавать также

прижимающую силу для автомобиля, то можно сделать вывод, что команда специально демонтировала, или же намеренно не проектировала заднее антикрыло [3].

На рисунке 7 можно увидеть конструкцию гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродинамических боковых структур и только заднего антикрыла.



Рисунок 7 – Конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродинамических боковых структур и только заднего антикрыла

Абсолютно аналогичную ситуацию мы можем наблюдать у команды, изображенной на рисунке 7. Однако в данном случае, стоит отметить, что используется именно заднее антикрыло, а не переднее. Также стоит отметить, что команда отказалась не только от переднего антикрыла, но и от аэродинамического дна автомобиля. Хотелось бы отметить, что на рисунке 6 мы наблюдали автомобиль с двигателем внутреннего сгорания, а в данном случае мы можем видеть болид электрического класса, что означает, что задняя часть автомобиля весит достаточно много относительно болидов с ДВС. Скорее всего команде не хватало именно сцепления на задней оси, и

они испытывали чрезмерную поворачиваемость, именно поэтому было принято решение использовать только заднее антикрыло [14].

На 8 рисунке можно увидеть конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродна и только заднего антикрыла.



Рисунок 8 – Конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием аэродна и только заднего антикрыла

На рисунке 8 также можно увидеть электрический автомобиль, оборудованный только лишь задним антикрылом. Кроме того, хотелось бы отметить, что команда использует полноценное аэродинамическое дно автомобиля для повышения эффективности прижимной силы на задней оси. Что касается боковых структур, то у команды просто не было необходимости в добавлении дополнительных структур по бокам болида, потому что система охлаждения, как можно заметить из рисунка 8, была перенесена командой в заднюю часть автомобиля.

Также, хочется заметить, что команда использует малогабаритные 10-дюймовые колеса, за счет чего образуется меньше воздушного сопротивления, сопротивления качению, а также завихрений воздуха за колесами, именно поэтому боковые структуры могли бы быть не такими

полезными для данной команды, и не принесли бы команде желанного эффекта, а лишь добавили бы общей массы автомобилю.

Что же касается полного отсутствия какой-либо аэродинамики на передней оси, то скорее всего причина точно такая же, как и у команды с рисунка 7. Скорее всего, из-за того, что автомобиль электрический, данной команде не хватало сцепления шин с дорогой на задней оси, особенно при условии высокого бокового ускорения, и именно в этом случае прижимная сила позволяет команде увеличить сцепление на очень тяжелой задней оси и избежать заноса.

На рисунке 9 конструкцию гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием полного аэродинамического комплекта



Рисунок 9 – Конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием полного аэродинамического комплекта

На рисунке 9 можно увидеть гоночный болид класса «Формула Студент» знаменитой Мюнхенской команды. Данная команда имеет огромный многолетний опыт в автомобилестроении, также у команды большое количество спонсоров, материальных возможностей, производственных возможностей и человеческого ресурса.

Можно увидеть, что данной команде хватило и времени, и сил, и опыта рассчитать, спроектировать и изготовить полный аэродинамический комплект для своего болида. Кстати, стоит заметить, что данный болид также является электрическим. Однако, если сравнивать болиды топовых команд, и начинающих команд, то с производственными и материальными возможностями опытных команд, есть множество возможностей снизить массу гоночного болида, используя передовые технологии, дорогостоящие материалы, а также производственные возможности.

На рисунке 10 изображена конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием активной аэродинамики.

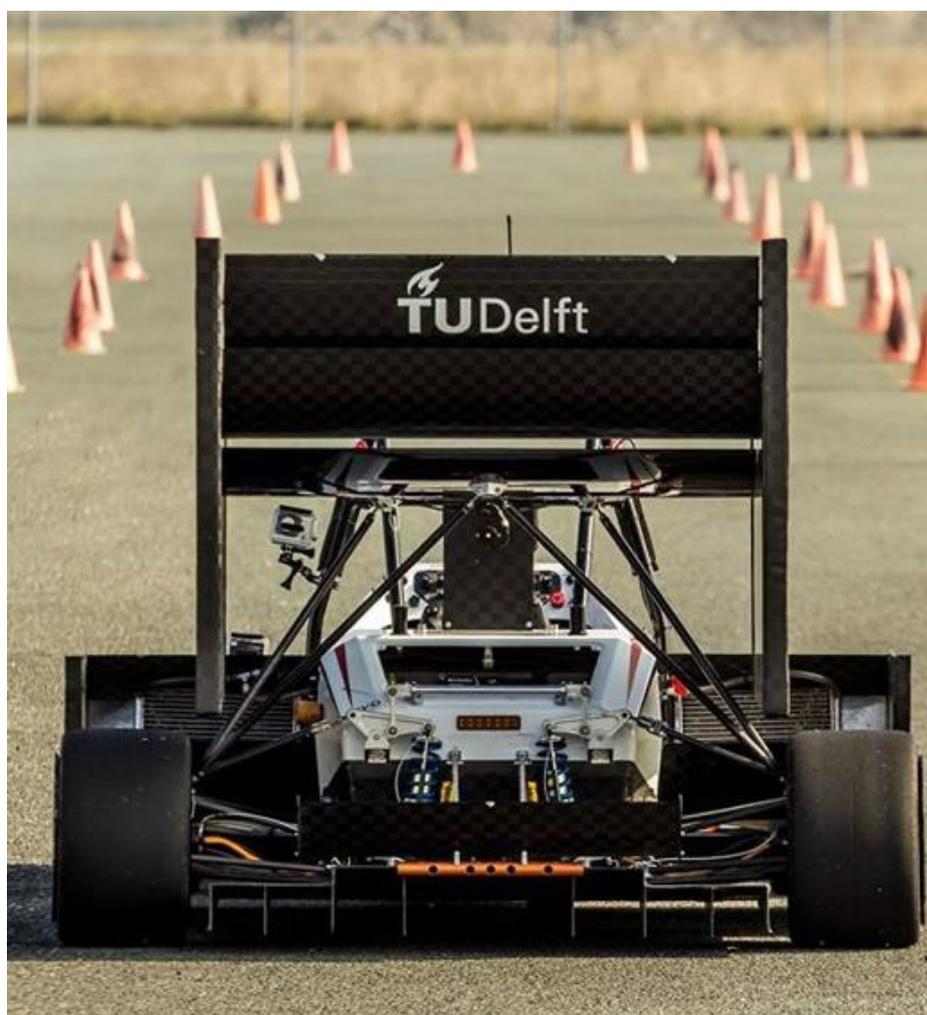


Рисунок 10 – Конструкция гоночного болида класса «Формула Студент» с использованием активной аэродинамики

«На рисунке 10 можно увидеть еще один гоночный болид класса «Формула Студент» другой знаменитой немецкой команды. Данная команда имеет огромный многолетний опыт в автомобилестроении, также у команды большое количество спонсоров, материальных возможностей, производственных возможностей и человеческого ресурса.

Можно заметить, что данная команда помимо того, что использует полный аэродинамический комплект, включающий монолитный аэродинамичный монокок, переднее антикрыло, заднее антикрыло, боковые диффузоры, аэродинамическое дно, также данная команда использует малогабаритные 8-дюймовые колеса, которые практически не создают аэродинамического сопротивления потокам воздуха, но самое главное, команда приняла решение использовать активную аэродинамику» [21].

Активная аэродинамика данной команды заключается в том, что аэродинамические элементы имеют связь с элементами подвески болида, и поэтому во время движения по прямой аэродинамические элементы не дают сильного сопротивления, но вот когда появляется крен продольный или же поперечный, и появляется ход подвески, то изменяется угол атаки переднего и заднего антикрыла, и появляется значительная прижимная силы, которая помогает команде эффективно использовать болид на трассе [20].

Выводы по разделу

В данном разделе был рассмотрен основной регламент соревнований «Формула Студент», а также выявлены пункты регламента, относящиеся к проектированию аэродинамических элементов гоночного болида класса «Формула Студент». Также мы провели анализ существующих конструкций аэродинамических обвесов других команд, участвующих в соревнованиях «Формула Студент».

2 Теоретические аспекты, необходимые при разработке автомобильной аэродинамики

Правильная разработка и расчет аэродинамики, а также эффективность аэродинамических элементов гоночного автомобиля играют критически важную роль в достижении высоких результатов на соревнованиях, таких как «Формула Студент». Аэродинамика влияет на множество аспектов работы автомобиля, включая его скорость, стабильность, сцепление с дорогой и общую эффективность. В условиях гонок, где каждая деталь может оказать значительное влияние на производительность, тщательное внимание к аэродинамическим характеристикам становится неотъемлемой частью процесса проектирования.

Во-первых, аэродинамика напрямую влияет на скорость автомобиля. Снижение аэродинамического сопротивления позволяет автомобилю развивать более высокие скорости при меньших затратах энергии. Это особенно важно в гонках, где каждая секунда имеет значение. Правильное проектирование аэродинамических элементов, таких как антикрылья и диффузоры, может существенно уменьшить сопротивление воздуха, что позволяет автомобилю быстрее проходить прямые участки трассы.

Во-вторых, аэродинамика играет ключевую роль в создании прижимной силы. Прижимная сила необходима для обеспечения сцепления колес с дорогой, особенно в поворотах. Эффективные аэродинамические элементы помогают удерживать автомобиль на трассе и предотвращают его срыв при высоких скоростях. Например, передние и задние антикрылья создают разницу давления над и под автомобилем, что приводит к увеличению прижимной силы. Без должного внимания к этим элементам автомобиль может стать нестабильным и трудным в управлении.

Кроме того, правильный расчет аэродинамических характеристик позволяет оптимизировать баланс между прижимной силой и сопротивлением. Это означает, что команда должна стремиться к созданию

такой конфигурации автомобиля, которая обеспечит максимальную эффективность на различных участках трассы. Например, на длинных прямых участках может быть целесообразно уменьшить прижимную силу для снижения сопротивления воздуха, тогда как на поворотах необходимо увеличить прижимную силу для улучшения сцепления.

Также стоит отметить важность тестирования и верификации аэродинамических решений. Использование компьютерного моделирования (CFD) и wind tunnel testing позволяет командам визуализировать поток воздуха вокруг автомобиля и оценить эффективность различных конфигураций аэродинамических элементов еще до их физического создания. Это помогает избежать дорогостоящих ошибок и оптимизировать проект до начала практических испытаний.

Наконец, правильная разработка аэродинамики также способствует улучшению общей надежности автомобиля. Элементы с хорошей аэродинамической формой могут снизить нагрузку на компоненты автомобиля за счет уменьшения турбулентности и завихрений воздуха вокруг них. Это может привести к меньшему износу деталей и повышению долговечности автомобиля в условиях гонок.

Можно сказать, что правильная разработка и расчет аэродинамики гоночного автомобиля являются основополагающими для достижения успеха в соревнованиях. Аэродинамические характеристики влияют на скорость, стабильность и сцепление с дорогой – все это критически важно для успешного выступления команды. Тщательное внимание к этим аспектам не только повышает шансы на победу, но также способствует развитию инженерных навыков у студентов и формированию высококвалифицированных специалистов в области автомобильной инженерии.

Аэродинамика для автомобиля – это наука, изучающая взаимодействие автомобиля с воздухом, который его окружает. Она охватывает различные аспекты, включая поток воздуха вокруг кузова, влияние аэродинамических

элементов на характеристики автомобиля и способы минимизации сопротивления воздуха. Аэродинамика играет ключевую роль в проектировании автомобилей, так как она напрямую влияет на их производительность, эффективность и безопасность.

Основная цель аэродинамики в автомобилестроении заключается в снижении аэродинамического сопротивления, что позволяет автомобилю двигаться быстрее и экономичнее. Сопротивление воздуха – это сила, которая действует против движения автомобиля и требует дополнительных затрат энергии для преодоления. Чем меньше сопротивление, тем меньше топлива или энергии требуется для поддержания скорости. Это особенно важно для гоночных автомобилей, где каждая секунда имеет значение, а также для серийных автомобилей, где экономия топлива становится все более актуальной.

Кроме того, аэродинамика также отвечает за создание прижимной силы, которая необходима для обеспечения сцепления колес с дорогой. Прижимная сила возникает благодаря разнице давления между верхней и нижней частями автомобиля и помогает удерживать его на трассе при высоких скоростях и в поворотах. Без должного уровня прижимной силы автомобиль может стать нестабильным и трудным в управлении, что увеличивает риск аварий.

Если бы аэродинамика не учитывалась при разработке автомобилей, последствия были бы весьма серьезными. Во-первых, автомобили имели бы значительно более высокое аэродинамическое сопротивление, что привело бы к увеличению расхода топлива и снижению общей эффективности. Это означало бы не только большие затраты на топливо для водителей, но и более высокий уровень выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ в атмосферу.

Во-вторых, отсутствие учета аэродинамических характеристик могло бы привести к ухудшению управляемости автомобилей. Автомобили могли бы стать менее стабильными на высоких скоростях или в поворотах из-за

недостаточной прижимной силы. Это увеличивало бы риск аквапланирования или срыва автомобиля с траектории движения, что могло бы привести к авариям и травмам водителей и пассажиров.

Кроме того, автомобили без должной аэродинамической проработки могли бы иметь более громкий шум от ветра при движении на высоких скоростях. Это не только создавало бы дискомфорт для водителей и пассажиров, но также могло бы негативно сказаться на восприятии бренда производителем [23].

Также стоит отметить влияние плохой аэродинамики на дизайн автомобиля. Автомобили с неэффективной формой могут выглядеть менее привлекательно для потребителей. Современные автомобили часто проектируются с учетом эстетики и функциональности одновременно; игнорирование аэродинамических принципов может привести к созданию менее привлекательных моделей.

В заключение можно сказать, что аэродинамика является важнейшим аспектом проектирования автомобилей. Она влияет на скорость, эффективность топлива, управляемость и безопасность транспортного средства. Игнорирование аэродинамических характеристик при разработке автомобилей могло бы привести к значительным негативным последствиям как для производительности автомобилей, так и для безопасности их эксплуатации. Поэтому современные инженеры уделяют большое внимание изучению и применению аэродинамических принципов в своих проектах.

Лобовое сопротивление воздуха, также известное как аэродинамическое сопротивление, представляет собой силу, которая действует на автомобиль в направлении, противоположном его движению, из-за взаимодействия автомобиля с воздухом. Это сопротивление возникает в результате того, что воздух, сталкиваясь с передней частью автомобиля, создает область повышенного давления, в то время как за автомобилем образуется область пониженного давления. Лобовое сопротивление зависит от нескольких факторов, включая скорость автомобиля, плотность воздуха и

форму кузова.

Лобовое сопротивление имеет значительное влияние на производительность автомобиля. При увеличении скорости автомобиля лобовое сопротивление возрастает экспоненциально. Это означает, что для поддержания высокой скорости требуется больше энергии для преодоления этого сопротивления. В результате автомобили с высоким лобовым сопротивлением потребляют больше топлива или энергии, что приводит к снижению общей эффективности и увеличению эксплуатационных затрат. Особенно это актуально для спортивных и гоночных автомобилей, где каждая секунда имеет значение и где экономия топлива может оказать влияние на стратегию гонки. На рисунке 11 можно увидеть наглядное влияние лобового сопротивления воздуха на автомобиль [30].

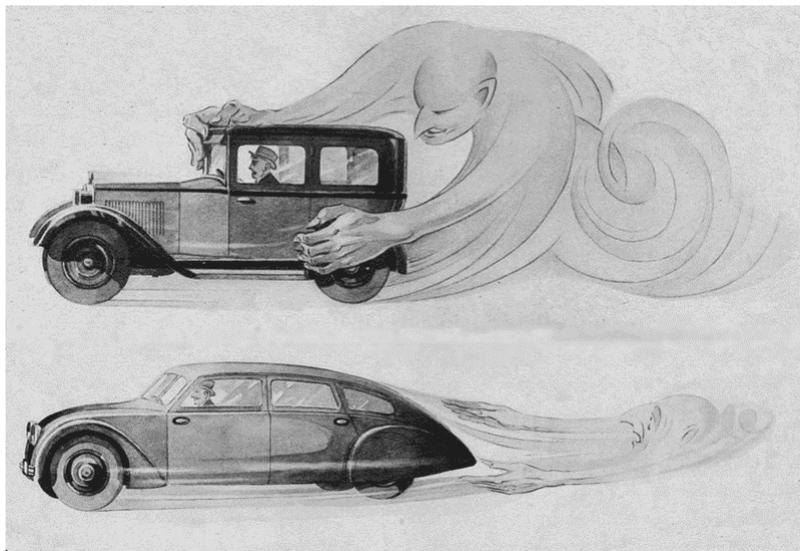


Рисунок 11 – Наглядное влияние лобового сопротивления воздуха на автомобиль

Придавать автомобилю аэродинамичную форму необходимо по нескольким причинам. Во-первых, аэродинамичная форма помогает минимизировать лобовое сопротивление. Автомобили с обтекаемыми контурами и гладкими поверхностями позволяют воздуху легче проходить вокруг них, что снижает силу сопротивления. Это не только улучшает

топливную эффективность, но и позволяет автомобилю развивать более высокие скорости при меньших затратах энергии [1].

Во-вторых, аэродинамичная форма способствует созданию прижимной силы. Прижимная сила необходима для обеспечения сцепления колес с дорогой, особенно при движении на высоких скоростях или в поворотах. Элементы дизайна, такие как антикрылья и диффузоры, могут быть интегрированы в аэродинамичную форму автомобиля для увеличения прижимной силы и улучшения управляемости.

Кроме того, аэродинамичная форма также влияет на шум от ветра при движении автомобиля. Автомобили с хорошей аэродинамикой создают меньше турбулентности и завихрений воздуха вокруг себя, что приводит к снижению уровня шума в салоне. Это создает более комфортные условия для водителя и пассажиров [17].

Стоит отметить важность аэродинамики для безопасности автомобиля. Хорошо спроектированные автомобили имеют более предсказуемое поведение на дороге благодаря оптимальному распределению воздушных потоков вокруг кузова. Это помогает предотвратить потерю контроля над автомобилем при высоких скоростях или в сложных условиях движения.

Можно сказать, что лобовое сопротивление воздуха является важным фактором, влияющим на производительность автомобилей. Придавая автомобилю аэродинамичную форму, инженеры стремятся минимизировать это сопротивление, улучшить топливную эффективность и создать более стабильное и безопасное транспортное средство [16]. Аэродинамика становится неотъемлемой частью проектирования современных автомобилей как с точки зрения производительности, так и комфорта эксплуатации.

Испытания в аэродинамической трубе являются важным этапом в процессе проектирования и разработки автомобилей, поскольку они позволяют производителям оценить аэродинамические характеристики транспортных средств в контролируемых условиях. Аэродинамическая труба – это специализированное оборудование, в котором создается поток воздуха,

имитирующий условия движения автомобиля на дороге. Эти испытания помогают инженерам и дизайнерам понять, как воздух взаимодействует с автомобилем, и выявить потенциальные проблемы, которые могут возникнуть при его эксплуатации.

Основная цель испытаний в аэродинамической трубе заключается в снижении аэродинамического сопротивления автомобиля. Производители стремятся добиться минимального сопротивления воздуха, чтобы улучшить топливную эффективность и повысить скорость автомобиля. В процессе испытаний специалисты могут экспериментировать с различными формами кузова, углами наклона и другими аэродинамическими элементами, такими как антикрылья и диффузоры. Это позволяет определить оптимальные параметры дизайна, которые обеспечат наилучшие аэродинамические характеристики.

Кроме того, испытания в аэродинамической трубе помогают производителям оценить уровень прижимной силы, создаваемой автомобилем. Прижимная сила необходима для обеспечения стабильности и управляемости автомобиля на высоких скоростях. Инженеры могут анализировать распределение давления по поверхности кузова и выявлять участки, где необходимо внести изменения для улучшения сцепления колес с дорогой. Это особенно важно для спортивных автомобилей и гоночных машин, где каждая деталь может оказать значительное влияние на производительность.

Испытания также позволяют оценить влияние различных аэродинамических элементов на поведение автомобиля. Например, добавление спойлеров или антикрыльев может значительно изменить поток воздуха вокруг автомобиля и повлиять на его устойчивость. Инженеры могут использовать данные испытаний для оптимизации этих элементов и достижения лучшего баланса между прижимной силой и сопротивлением. На рисунке 12 можно увидеть, как проводятся испытания в аэродинамической трубе.



Рисунок 12 – Испытания автомобиля в аэродинамической трубе

Кроме того, аэродинамические испытания помогают выявить потенциальные проблемы с шумом от ветра. Автомобили с плохой аэродинамикой могут создавать значительный уровень шума при движении на высоких скоростях из-за турбулентного потока воздуха вокруг кузова. Испытания в аэродинамической трубе позволяют инженерам определить источники шума и разработать решения для их устранения, что способствует созданию более комфортного салона для водителя и пассажиров.

Также стоит отметить важность тестирования для безопасности автомобиля. Хорошо спроектированные автомобили имеют предсказуемое поведение на дороге благодаря оптимальному распределению воздушных потоков вокруг кузова. Испытания помогают выявить потенциальные проблемы с управляемостью или устойчивостью автомобиля при различных

условиях движения.

Испытания в аэродинамической трубе являются неотъемлемой частью процесса разработки автомобилей. Они позволяют производителям достигать высоких результатов в области топливной эффективности, скорости, управляемости и комфорта эксплуатации. Используя данные, полученные во время этих испытаний, инженеры могут оптимизировать дизайн автомобилей и создавать более безопасные и эффективные транспортные средства для потребителей [4].

Аэродинамичность автомобиля – это его способность эффективно взаимодействовать с воздушным потоком, что напрямую влияет на лобовое сопротивление и прижимную силу. Эти характеристики зависят от множества параметров и факторов, которые определяют, насколько хорошо автомобиль может преодолевать сопротивление воздуха и сохранять стабильность на дороге [26].

Первым и наиболее важным фактором, влияющим на аэродинамичность, является форма кузова автомобиля. Обтекаемые линии и гладкие поверхности способствуют снижению лобового сопротивления, так как они позволяют воздуху легче проходить вокруг автомобиля. Классические формы, такие как каплевидная или обтекаемая, минимизируют образование турбулентных потоков, которые создают дополнительное сопротивление. Углы наклона передней и задней частей автомобиля также играют ключевую роль: более острые углы на передней части помогают разрывать воздушный поток, а плавные линии на задней части уменьшают завихрения.

На рисунке 13 можно увидеть один из самых аэродинамичных автомобилей с точки зрения теории.



Рисунок 13 – Один из самых аэродинамичных автомобилей с точки зрения теории

Вторым важным аспектом является высота и ширина автомобиля. Низкие и широкие автомобили обычно имеют лучшее аэродинамическое поведение по сравнению с высокими и узкими моделями. Это связано с тем, что меньшая высота снижает объем воздуха, который необходимо обойти, а большая ширина может создавать дополнительные завихрения. Также стоит учитывать клиренс – расстояние между нижней частью автомобиля и дорогой. Низкий клиренс способствует уменьшению потока воздуха под автомобилем, что также помогает снизить лобовое сопротивление.

Третий фактор – это наличие аэродинамических элементов, таких как спойлеры, антикрылья и диффузоры. Эти элементы могут значительно улучшить прижимную силу за счет изменения направления воздушного потока вокруг автомобиля. Спойлеры помогают создать дополнительное давление вниз на задней оси автомобиля, что увеличивает сцепление колес с дорогой и улучшает управляемость на высоких скоростях. Антикрылья могут быть настроены для достижения оптимального баланса между прижимной

силой и лобовым сопротивлением. На рисунке 14 можно увидеть гоночный автомобиль Формула-1, использующий все дополнительные аэродинамические элементы.



Рисунок 14 – Гоночный болид Формула-1

Четвертым аспектом является использование активной аэродинамики. Современные автомобили могут быть оснащены системами, которые автоматически регулируют положение аэродинамических элементов в зависимости от скорости движения или условий дороги. Это позволяет оптимизировать характеристики автомобиля в реальном времени: например, при низких скоростях элементы могут быть убраны для снижения сопротивления, а при высоких скоростях – выдвинуты для увеличения прижимной силы [12].

Пятый фактор – это материалы и технологии производства. Легкие

материалы, такие как углеродное волокно или алюминий, позволяют создавать более тонкие и обтекаемые формы без увеличения веса автомобиля. Это важно для достижения хорошей аэродинамичности без ущерба для производительности.

Также стоит учитывать влияние колесных арок и дисков на аэродинамику. Закрытые диски или специальные формы колесных арок могут помочь уменьшить завихрения воздуха вокруг колес, что также снижает лобовое сопротивление.

В заключение можно сказать, что аэродинамичность автомобиля зависит от множества факторов: формы кузова, высоты и ширины автомобиля, наличия аэродинамических элементов, использования активной аэродинамики и материалов конструкции. Оптимизация этих параметров позволяет достичь хорошей прижимной силы и минимального лобового сопротивления, что в свою очередь способствует повышению топливной эффективности, скорости и безопасности автомобиля на дороге.

Аэродинамическая эффективность автомобиля во многом зависит от его конструкции, включая форму кузова и особенности колес. В этом контексте автомобили с закрытыми колесами, то есть с колесными арками, обеспечивают лучшую аэродинамическую эффективность по сравнению с автомобилями с открытыми колесами. Это связано с несколькими ключевыми факторами.

Во-первых, открытые колеса создают значительное количество завихрений в воздушных потоках. Когда воздух проходит мимо автомобиля, он сталкивается с колесами, которые выступают за пределы кузова. Это приводит к образованию турбулентных потоков вокруг колес, что увеличивает лобовое сопротивление. Завихрения возникают из-за того, что воздух не может плавно обтекать колеса, и вместо этого образует вихри и потоки, которые создают дополнительное сопротивление движению автомобиля. Эти турбулентные потоки могут также вызывать нестабильность при движении на высоких скоростях, что негативно сказывается на

управляемости и безопасности. На рисунке 15 можно увидеть симуляцию аэродинамики для гоночного автомобиля с открытыми колесами [18].

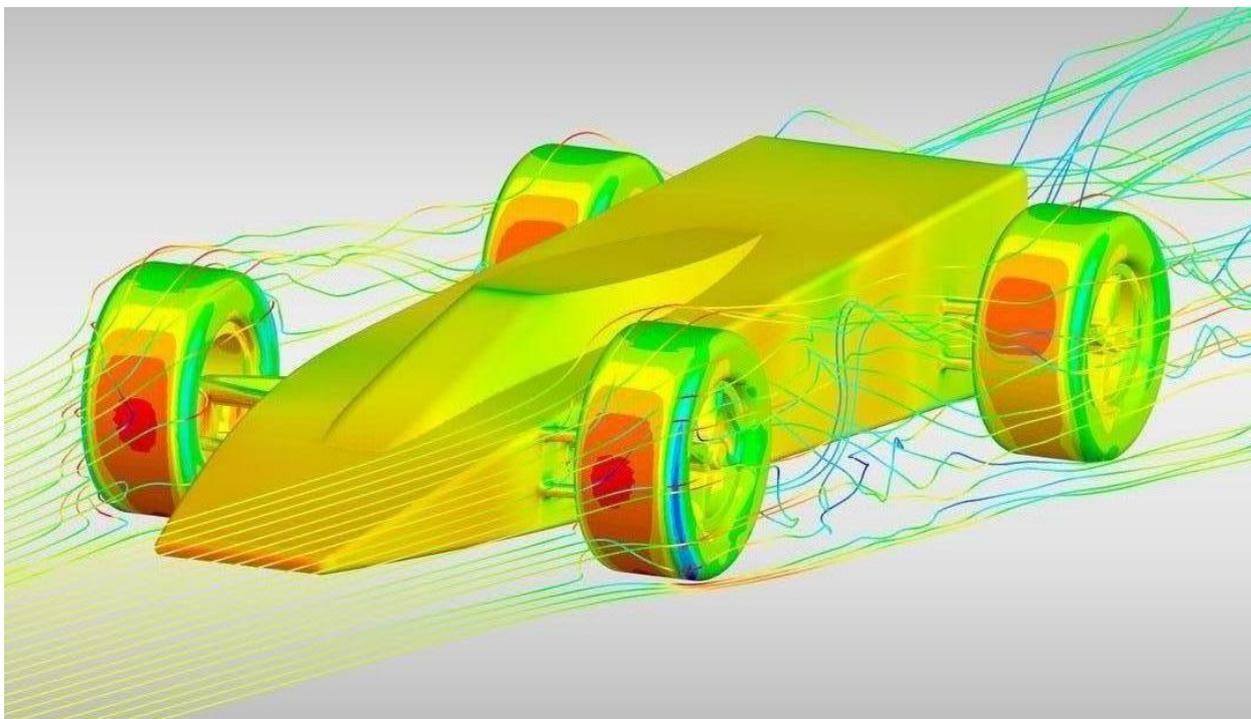


Рисунок 15 – Завихрения воздушных потоков у автомобиля с открытыми колесами

Во-вторых, закрытые колесные арки помогают направить воздушный поток более гладко вокруг автомобиля. Они уменьшают количество открытых поверхностей, которые могут создавать завихрения, и позволяют воздуху более эффективно обтекать кузов. Это снижает лобовое сопротивление и способствует улучшению общей аэродинамической эффективности автомобиля. Закрытые колеса также помогают уменьшить шум от ветра, который возникает из-за взаимодействия воздуха с открытыми колесами. На рисунке 16 можно увидеть симуляцию аэродинамичности колес серийного автомобиля с закрытыми колесами.

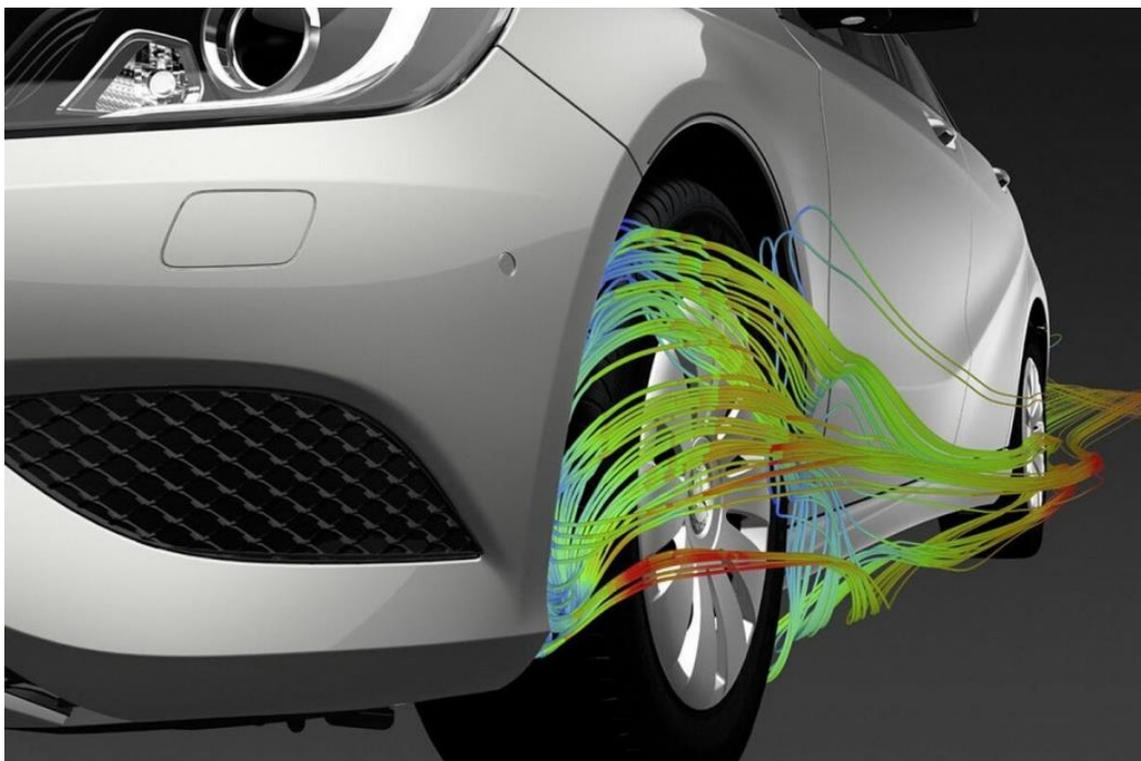


Рисунок 16 – Завихрения воздушных потоков у автомобиля с закрытыми колесами

Кроме того, автомобили с закрытыми колесами могут использовать специальные аэродинамические элементы для управления потоком воздуха вокруг колес и кузова. Например, диффузоры и спойлеры могут быть интегрированы в дизайн автомобиля для оптимизации воздушного потока и увеличения прижимной силы без значительного увеличения лобового сопротивления [19].

Важно отметить, что в некоторых случаях открытые колеса могут быть предпочтительными для определенных типов автомобилей, таких как спортивные или гоночные машины. В таких случаях акцент может делаться на максимальную прижимную силу и управляемость на трассе, где завихрения от открытых колес могут быть менее критичными по сравнению с общей производительностью автомобиля.

Автомобили с закрытыми колесами имеют лучшую аэродинамическую эффективность по сравнению с автомобилями с открытыми колесами благодаря снижению завихрений воздушных потоков и улучшению

управления воздушным потоком вокруг кузова. Это позволяет уменьшить лобовое сопротивление и повысить стабильность на высоких скоростях, что делает такие автомобили более эффективными в плане топливной экономичности и общей производительности.

Профиль Жуковского – это аэродинамический профиль, который был разработан советским ученым Александром Жуковским в начале XX века. Этот профиль представляет собой обтекаемую форму, которая используется для анализа и проектирования крыльев самолетов и других аэродинамических объектов. Он имеет характерную каплевидную форму, которая обеспечивает оптимальное распределение давления по поверхности профиля, что в свою очередь влияет на его аэродинамические характеристики.

Профиль Жуковского характеризуется несколькими ключевыми параметрами, такими как толщина, угол атаки и форма передней и задней кромок. Эти параметры определяют, как воздух будет обтекать профиль, а также его подъемную силу и сопротивление. Основная идея профиля заключается в том, что он должен обеспечивать минимальное сопротивление при максимальной подъемной силе. Это достигается благодаря тому, что форма профиля позволяет воздуху плавно обтекать его поверхность, создавая разницу давления между верхней и нижней частями профиля.

На рисунке 17 можно увидеть профиль Жуковского.

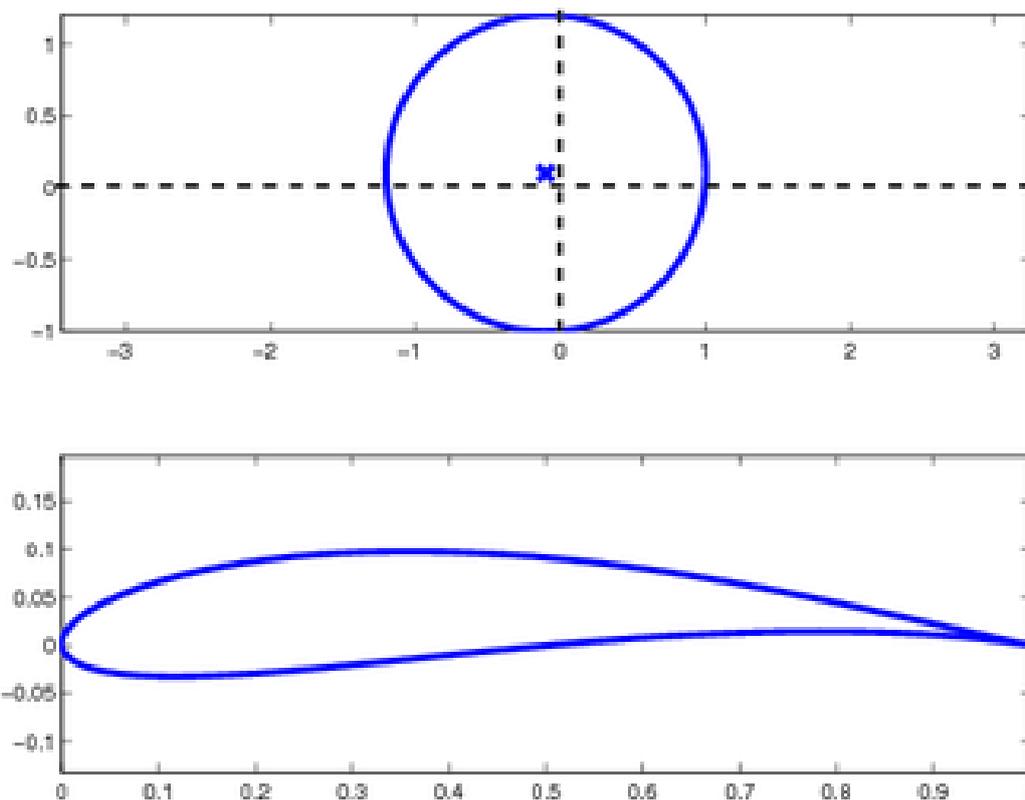


Рисунок 17 – Профиль Жуковского

В контексте аэродинамики автомобилей профиль Жуковского может быть применен для оптимизации формы кузова и улучшения его аэродинамических характеристик. Хотя автомобили не используют крылья в традиционном смысле, принципы, заложенные в профиль Жуковского, могут быть адаптированы для создания обтекаемых форм кузова, которые минимизируют лобовое сопротивление и увеличивают прижимную силу.

Когда автомобиль имеет форму, близкую к профилю Жуковского, он способен более эффективно взаимодействовать с воздушным потоком. Это приводит к снижению лобового сопротивления – силы, которая противодействует движению автомобиля вперед. Снижение лобового сопротивления позволяет автомобилю расходовать меньше энергии на преодоление сопротивления воздуха, что в свою очередь улучшает топливную экономичность и увеличивает скорость.

Кроме того, применение принципов профиля Жуковского может

помочь в создании прижимной силы. Прижимная сила важна для стабильности автомобиля на высоких скоростях; она помогает удерживать колеса на дороге и улучшает управляемость. Если кузов автомобиля спроектирован с учетом аэродинамических принципов профиля Жуковского, это может привести к более равномерному распределению давления по поверхности кузова и улучшению сцепления колес с дорогой.

На рисунке 18 можно увидеть наглядный пример использования профиля Жуковского для создания прижимной или подъемной силы.

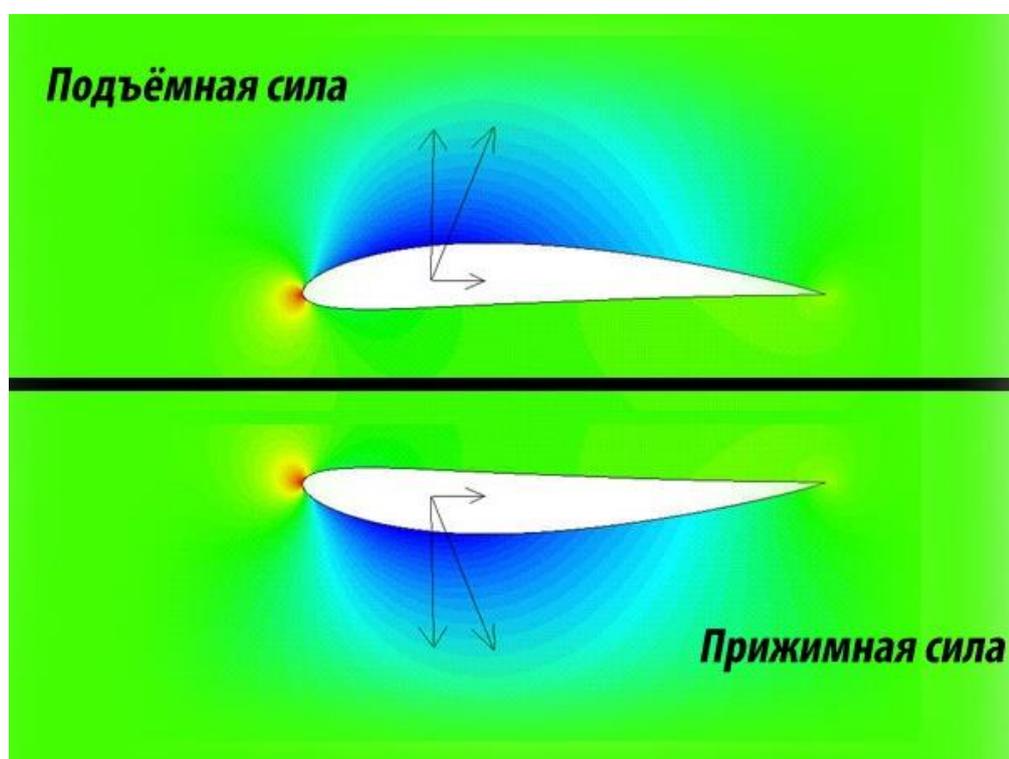


Рисунок 18 – Наглядный пример использования профиля Жуковского для создания прижимной или подъемной силы

Также стоит отметить, что профиль Жуковского может быть использован для анализа различных аэродинамических элементов автомобиля – таких как спойлеры и антикрылья – которые могут дополнительно улучшить его аэродинамические характеристики. Эти элементы могут быть спроектированы таким образом, чтобы создавать необходимую прижимную силу без значительного увеличения лобового

сопротивления.

Профиль Жуковского представляет собой важный инструмент в области аэродинамики как для авиации, так и для автомобилестроения. Его применение позволяет создавать более обтекаемые формы кузова автомобилей, что способствует снижению лобового сопротивления и увеличению прижимной силы. Это приводит к улучшению топливной эффективности и общей производительности автомобилей на дороге.

Угол атаки аэродинамических элементов автомобиля – это угол между направлением потока воздуха и линией, проведенной вдоль поверхности аэродинамического элемента, такого как спойлер, антикрыло или диффузор. Этот угол играет ключевую роль в определении аэродинамических характеристик автомобиля, включая подъемную силу и лобовое сопротивление. Правильная настройка угла атаки может значительно повлиять на производительность автомобиля, особенно при высоких скоростях.

Когда воздух обтекает аэродинамический элемент, он создает разницу давления между верхней и нижней частями элемента. Угол атаки влияет на то, как воздух взаимодействует с элементом: при увеличении угла атаки увеличивается подъемная сила до определенного предела. Это происходит потому, что воздух движется быстрее над верхней частью элемента и медленнее под ним, создавая разницу давления. Однако если угол атаки становится слишком большим, это может привести к потере подъемной силы и возникновению турбулентности, что в свою очередь увеличивает лобовое сопротивление.

Аэродинамические элементы с правильным углом атаки могут значительно улучшить сцепление автомобиля с дорогой. Например, спойлеры и антикрылья предназначены для создания прижимной силы, которая помогает удерживать колеса на дороге при высоких скоростях. Это особенно важно для спортивных автомобилей и гоночных машин, где стабильность и управляемость критически важны. Прижимная сила помогает

предотвратить срыв сцепления колес с дорогой, что может привести к потере контроля над автомобилем. На рисунке 19 можно увидеть различные углы атаки антикрыла автомобиля.

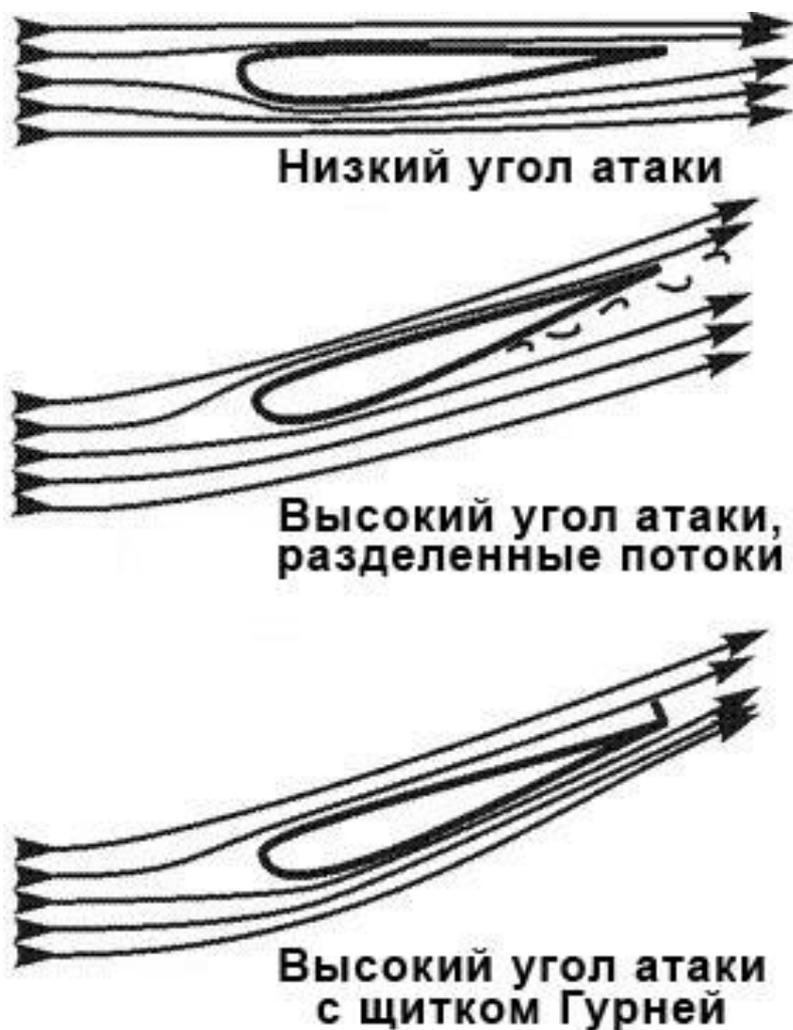


Рисунок 19 – Угол атаки антикрыла автомобиля

Кроме того, угол атаки также влияет на эффективность работы аэродинамических элементов. Например, если спойлер установлен под слишком большим углом атаки, он может создать избыточное лобовое сопротивление, что негативно скажется на топливной экономичности автомобиля. С другой стороны, недостаточный угол атаки может не обеспечить достаточной прижимной силы для достижения оптимальной производительности [11].

Важно отметить, что угол атаки не является фиксированным значением; он может изменяться в зависимости от скорости автомобиля и условий движения. Некоторые современные автомобили оснащены активными аэродинамическими системами, которые автоматически регулируют угол атаки аэродинамических элементов в зависимости от скорости и других факторов. Это позволяет оптимизировать характеристики автомобиля в реальном времени: например, при низких скоростях элементы могут быть убраны или установлены под меньшим углом для снижения лобового сопротивления, а при высоких скоростях – выдвинуты или установлены под большим углом для увеличения прижимной силы.

Угол атаки аэродинамических элементов автомобиля является важным параметром, который влияет на его аэродинамические характеристики. Правильная настройка этого угла позволяет достичь оптимального баланса между подъемной силой и лобовым сопротивлением, что в свою очередь улучшает управляемость и стабильность автомобиля на дороге. Адаптация угла атаки в зависимости от условий движения также способствует повышению общей эффективности автомобиля.

Гоночные инженеры устанавливают на автомобили множество различных аэродинамических элементов с целью оптимизации их производительности на трассе. Основная задача этих элементов заключается в управлении воздушными потоками вокруг автомобиля, что критически важно для достижения максимальной скорости, устойчивости и управляемости. Аэродинамика играет ключевую роль в снижении лобового сопротивления и увеличении прижимной силы, что позволяет автомобилю лучше сцепляться с дорогой, особенно в поворотах.

Передние антикрылья, например, направляют поток воздуха так, чтобы создать дополнительную прижимную силу на передней оси. Это улучшает управляемость автомобиля и позволяет гонщику более точно контролировать направление движения. Задние антикрылья выполняют аналогичную функцию для задней оси, обеспечивая стабильность на высоких скоростях и в

сложных маневрах. Диффузоры, расположенные под днищем автомобиля, ускоряют поток воздуха под машиной, создавая эффект разрежения, который дополнительно увеличивает прижимную силу без значительного увеличения сопротивления.

Спойлеры и боковые дефлекторы также играют важную роль в аэродинамической эффективности. Они помогают контролировать турбулентность и направляют воздух так, чтобы минимизировать подъемные силы и улучшить охлаждение компонентов автомобиля, таких как тормоза и двигатель. Кроме того, правильное размещение и форма этих элементов могут значительно снизить вероятность возникновения срывов потока, что может привести к потере контроля над автомобилем [24].

Инженеры также учитывают условия конкретной трассы при настройке аэродинамических элементов. Например, на трассах с большим количеством поворотов может потребоваться больше прижимной силы для обеспечения стабильности в поворотах, тогда как на высокоскоростных прямых участках акцент может быть сделан на снижение лобового сопротивления для достижения максимальной скорости.

Комплексное применение различных аэродинамических решений позволяет гоночным автомобилям достигать высоких результатов за счет улучшения их динамических характеристик. Это требует глубоких знаний физики и инженерии, а также постоянного тестирования и доработки элементов для достижения оптимального баланса между скоростью и управляемостью. Таким образом, аэродинамика становится одним из ключевых аспектов гоночного автомобилестроения, определяющим успех команды на трассе.

Спойлер и заднее антикрыло – это два различных аэродинамических элемента, которые устанавливаются на гоночные автомобили, и каждый из них выполняет свои уникальные функции, влияя на характеристики автомобиля по-разному. Основное различие между ними заключается в их конструкции и принципе работы. Спойлер представляет собой плоскую или

слегка изогнутую поверхность, которая устанавливается под углом к потоку воздуха. Его основная задача – нарушать поток воздуха, создавая турбулентность, что помогает уменьшить подъемную силу, возникающую на кузове автомобиля. Это особенно важно на высоких скоростях, когда подъемная сила может привести к потере сцепления с дорогой и ухудшению управляемости. Спойлеры обычно имеют более простую конструкцию и могут быть менее эффективными в создании прижимной силы по сравнению с антикрыльями. На рисунке 20 можно увидеть пример спойлера [10].



Рисунок 20 – Пример спойлера

Заднее антикрыло, в свою очередь, представляет собой более сложный элемент с двумя или более плоскостями, который специально разработан для создания значительной прижимной силы. Антикрыло работает по принципу подъемной силы: когда воздух проходит над его поверхностью, он создает разницу давления между верхней и нижней сторонами, что приводит к созданию силы, направленной вниз. Это позволяет автомобилю лучше сцепляться с дорогой, особенно в поворотах и на высоких скоростях. Задние

антикрыла могут быть настроены для достижения оптимального баланса между прижимной силой и лобовым сопротивлением, что делает их более универсальными для различных условий гонок. На рисунке 21 можно увидеть пример заднего антикрыла [9].



Рисунок 21 – Пример заднего антикрыла

Влияние этих элементов на автомобиль также различается. Спойлеры в основном помогают контролировать подъемную силу и улучшают стабильность автомобиля на высоких скоростях, но они не создают значительного уровня прижимной силы. Это может быть достаточным для некоторых типов гонок или автомобилей с низкой мощностью. Антикрылья же обеспечивают гораздо большую прижимную силу, что позволяет гонщикам проходить повороты с большей скоростью и уверенностью. Однако увеличение прижимной силы также может привести к увеличению лобового сопротивления, поэтому инженеры должны находить баланс между

этими двумя факторами [5].

Таким образом, выбор между спойлером и задним антикрылом зависит от конкретных требований гонки и характеристик автомобиля. В то время как спойлеры могут быть полезны для улучшения стабильности на высоких скоростях без значительного увеличения веса или сложности конструкции, задние антикрыла обеспечивают более высокий уровень производительности за счет создания значительной прижимной силы, что делает их предпочтительными для большинства современных гоночных автомобилей.

Переднее антикрыло – это важный аэродинамический элемент, установленный на передней части гоночного автомобиля, который играет ключевую роль в управлении воздушными потоками вокруг машины. Основная функция переднего антикрыла заключается в создании прижимной силы на передней оси автомобиля, что значительно улучшает сцепление колес с дорогой и, как следствие, управляемость автомобиля. Конструкция антикрыла обычно включает в себя несколько плоскостей, которые могут быть настроены под различными углами для оптимизации аэродинамических характеристик [25].

Когда автомобиль движется, воздух проходит над и под антикрылом. Благодаря своей форме и углу наклона антикрыло создает разницу давления между верхней и нижней сторонами. Это приводит к возникновению силы, направленной вниз, которая прижимает переднюю часть автомобиля к дороге. Увеличение прижимной силы на передней оси позволяет гонщику проходить повороты с большей скоростью и уверенностью, так как улучшенное сцепление снижает вероятность срыва задней части автомобиля и увеличивает стабильность в маневрах.

На рисунке 22 можно увидеть пример переднего антикрыла гоночного автомобиля.



Рисунок 22 – Пример переднего антикрыла

Кроме того, переднее антикрыло помогает контролировать баланс автомобиля. Правильная настройка угла наклона антикрыла может изменить распределение прижимной силы между передней и задней осями, что позволяет инженерам адаптировать поведение автомобиля под конкретные условия трассы или стиль вождения гонщика. Например, если требуется больше сцепления на передних колесах для прохождения поворотов, угол наклона может быть увеличен. Однако это также может привести к увеличению лобового сопротивления, что важно учитывать на прямых участках трассы.

Передние антикрыла также могут быть оснащены дополнительными элементами, такими как боковые дефлекторы или флипы, которые помогают управлять потоком воздуха вокруг колес и кузова автомобиля. Эти элементы уменьшают турбулентность и способствуют более эффективному использованию аэродинамических характеристик всего автомобиля.

Влияние переднего антикрыла на автомобиль не ограничивается только

улучшением сцепления и управляемости; оно также влияет на общую производительность машины. Правильная настройка антикрыла может помочь снизить время круга за счет повышения скорости в поворотах и улучшения стабильности на высоких скоростях. Однако важно отметить, что слишком большая прижимная сила может привести к увеличению износа шин и повышенному сопротивлению движению, что требует от инженеров тщательной настройки всех аэродинамических элементов.

Переднее антикрыло является критически важным компонентом гоночного автомобиля, который значительно влияет на его динамические характеристики. Оно помогает обеспечить необходимое сцепление с дорогой, улучшает управляемость и позволяет гонщикам достигать высоких результатов на трассе благодаря оптимизации аэродинамических свойств машины.

Боковые аэродинамические диффузоры – это специализированные элементы, устанавливаемые на боковых частях гоночного автомобиля, которые играют важную роль в управлении воздушными потоками и улучшении аэродинамических характеристик машины. Основная функция боковых диффузоров заключается в создании эффекта разрежения, который способствует увеличению прижимной силы и снижению лобового сопротивления. Эти элементы работают в сочетании с другими аэродинамическими компонентами, такими как передние антикрыла и задние спойлеры, для достижения оптимальной производительности автомобиля на трассе.

Когда автомобиль движется, воздух обтекает его кузов и попадает в область боковых диффузоров. Конструкция диффузоров обычно включает в себя расширяющиеся каналы, которые направляют поток воздуха вниз и наружу от автомобиля. Это создает разницу давления между верхней и нижней частями диффузора, что приводит к образованию силы, направленной вниз. Таким образом, боковые диффузоры помогают увеличить прижимную силу на задней оси автомобиля, что улучшает

сцепление колес с дорогой и повышает стабильность при прохождении поворотов.

Кроме того, боковые диффузоры помогают управлять турбулентностью воздуха вокруг колес и кузова автомобиля. Они уменьшают завихрения и создают более упорядоченный поток воздуха, что снижает сопротивление движению. Это особенно важно на высоких скоростях, когда даже небольшие изменения в аэродинамике могут существенно повлиять на производительность автомобиля. Эффективные боковые диффузоры также способствуют улучшению охлаждения тормозов и других компонентов автомобиля за счет увеличения потока воздуха к этим критически важным частям.

Влияние боковых аэродинамических диффузоров на автомобиль также связано с балансом между прижимной силой и лобовым сопротивлением. Правильная настройка этих элементов позволяет инженерам находить оптимальный компромисс между необходимым уровнем сцепления с дорогой и эффективностью движения на прямых участках трассы. Например, увеличение угла наклона или изменение формы диффузора может привести к большему созданию прижимной силы, но также может увеличить лобовое сопротивление. Поэтому инженеры должны тщательно анализировать характеристики автомобиля и условия гонки для достижения максимальной производительности.

В современных гоночных автомобилях боковые аэродинамические диффузоры становятся все более сложными и высокотехнологичными. Они могут быть интегрированы с другими аэродинамическими элементами для создания комплексной системы управления воздухом вокруг автомобиля. Это позволяет командам адаптировать свои машины под различные условия трассы и стили вождения гонщиков.

На рисунке 23 можно увидеть пример боковых диффузоров гоночного автомобиля.



Рисунок 23 – Пример боковых диффузоров

Боковые аэродинамические диффузоры являются ключевыми компонентами гоночного автомобиля, которые значительно влияют на его динамические характеристики. Они помогают увеличить прижимную силу, улучшить сцепление с дорогой и снизить лобовое сопротивление, что в итоге способствует повышению общей производительности машины на трассе.

Аэродинамическое дно гоночного автомобиля – это ключевой элемент его конструкции, который играет важную роль в управлении воздушными потоками и создании прижимной силы. Оно представляет собой плоскую или слегка изогнутую поверхность, расположенную под кузовом автомобиля, и предназначено для оптимизации аэродинамических характеристик. Основная

функция аэродинамического дна заключается в том, чтобы направлять поток воздуха таким образом, чтобы создать разрежение под автомобилем, что приводит к увеличению прижимной силы и улучшению сцепления с дорогой.

Когда автомобиль движется, воздух обтекает его кузов и попадает на аэродинамическое дно. В отличие от обычных автомобилей, где дно может быть менее оптимизировано, гоночные автомобили имеют специально спроектированные элементы, которые помогают управлять потоком воздуха. Аэродинамическое дно может включать в себя различные компоненты, такие как каналы, дефлекторы и диффузоры, которые работают вместе для создания эффекта «вакуумирования» под автомобилем. Это разрежение приводит к тому, что автомобиль «прилипает» к дороге, что позволяет ему проходить повороты с большей скоростью и повышает общую стабильность.

Одним из основных аспектов аэродинамического дна является его способность снижать лобовое сопротивление. Когда воздух проходит под автомобилем, он создает более упорядоченный поток по сравнению с тем, что происходит вокруг кузова. Это уменьшает завихрения и турбулентность, что в свою очередь снижает сопротивление движению. Таким образом, хорошо спроектированное аэродинамическое дно помогает не только увеличить прижимную силу, но и улучшить эффективность автомобиля на прямых участках трассы.

Кроме того, аэродинамическое дно влияет на распределение веса автомобиля. Правильная настройка этого элемента может помочь сбалансировать нагрузку на переднюю и заднюю оси, что улучшает управляемость и стабильность во время движения. Это особенно важно в гонках, где каждая деталь имеет значение для достижения максимальной производительности.

На рисунке 24 можно увидеть пример аэродинамического дна гоночного автомобиля.



Рисунок 24 – Пример аэродинамического дна гоночного автомобиля

Аэродинамическое дно также способствует охлаждению различных компонентов автомобиля. Поток воздуха, проходящий через специальные каналы или отверстия в дне автомобиля, может быть направлен к радиатору или тормозам для предотвращения перегрева во время гонки. Это позволяет поддерживать оптимальную рабочую температуру двигателя и тормозной системы даже в условиях интенсивного использования.

В современных гоночных автомобилях аэродинамическое дно становится все более сложным и высокотехнологичным. Инженеры используют методы компьютерного моделирования и испытания в аэродинамических трубах для оптимизации формы и конструкции дна еще на этапе проектирования. Это позволяет им предсказывать поведение воздушных потоков и вносить необходимые изменения для достижения максимальной эффективности.

Таким образом, аэродинамическое дно гоночного автомобиля является критически важным элементом его конструкции. Оно влияет на прижимную силу, лобовое сопротивление и распределение веса автомобиля, а также способствует охлаждению ключевых компонентов. Оптимизация аэродинамического дна позволяет значительно улучшить производительность автомобиля на трассе и повысить его управляемость в различных условиях гонки.

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены и описаны основные теоретические аспекты аэродинамики гоночного автомобиля, влияющие на управляемость и динамичность автомобиля. Кроме того, рассмотрены основные аэродинамические элементы гоночного автомобиля по-отдельности и в совокупности, описаны преимущества каждого из элементов.

3 Разработка эффективных аэродинамических элементов для гоночного болида класса «Формула Студент»

3.1 Обзор автомобиля. Определение входных данных

Перед началом проектирования любого компонента для автомобиля крайне важно тщательно рассмотреть и проанализировать все входные данные, поскольку именно они закладывают основу для успешной реализации проекта и позволяют избежать множества ошибок на ранних этапах. Входные данные включают в себя технические требования, эксплуатационные условия, стандарты безопасности, а также ограничения по стоимости и производству. Например, при проектировании кузова или системы охлаждения необходимо учитывать аэродинамические характеристики, требования к прочности и долговечности, а также условия эксплуатации – такие как температура окружающей среды, влажность, наличие пыли или агрессивных веществ. Важно определить целевую аудиторию и предполагаемый режим эксплуатации автомобиля: будет ли он использоваться в городских условиях, на трассе или в тяжелых климатических зонах. Это влияет на выбор материалов, геометрии и технологических решений.

Тщательное рассмотрение входных данных позволяет сформировать четкое техническое задание и определить ключевые параметры будущего компонента. Например, при проектировании тормозной системы необходимо учитывать максимальные нагрузки, температурные режимы при торможении, а также требования по безопасности и соответствие нормативам. Анализ исходных данных помогает выявить возможные ограничения – например, ограничение по весу или размерам – что важно для интеграции компонента в общую конструкцию автомобиля. Кроме того, понимание входных данных способствует оптимизации конструкции: можно выбрать наиболее подходящие материалы и технологии производства, снизить издержки и

повысить качество конечного продукта.

Рассмотрение всех входных данных перед началом проектирования также помогает предсказать потенциальные проблемы и риски на ранних стадиях разработки. Это особенно важно при использовании компьютерных моделирований и симуляций: правильное определение условий моделирования (например, нагрузок, граничных условий или характеристик материалов) обеспечивает точность результатов и их релевантность к реальным условиям эксплуатации. В результате проект становится более надежным, эффективным и соответствующим требованиям заказчика и стандартам безопасности. Таким образом, систематический анализ всех входных данных перед началом проектирования является фундаментальным этапом, который обеспечивает качество разработки, сокращает сроки реализации проекта и способствует созданию конкурентоспособных автомобильных компонентов.

«Основные характеристики гоночного болида класса «Формула Студент» модели 2025 года Основные характеристики гоночного болида класса «Формула Студент» модели 2025 года:

- а) габаритные размеры болида:
 - 1) длина – 2710 мм,
 - 2) ширина – 1420 мм,
 - 3) высота – 1155 мм;
- б) колесная база болида – 1540 мм;
- в) передняя колея болида – 1200 мм;
- г) задняя колея болида – 1150 мм;
- д) снаряженная масса автомобиля – 195 кг;
- е) распределение веса по осям:
 - 1) 55 % задняя ось,
 - 2) 45 % передняя ось;
- ж) переднее правое колесо – 39 кг;
- и) переднее левое колесо – 37 кг;

- к) заднее правое колесо – 58 кг;
 - л) заднее левое колесо – 60 кг;
 - м) шасси– стальная пространственная рамная конструкция, из стальных труб (сталь 20) внешним диаметром 25 мм;
 - н) двигатель – КТМ 390;
 - п) объем двигателя – 390 см³;
 - р) мощность двигателя – 38 кВт (51 л.с);
 - с) топливо –RON98;
 - т) трансмиссия – цепная передача, задний привод;
 - у) ведущая звезда – 16 зубьев;
 - ф) ведомая звезда – 51 зуб;
 - х) цепь однорядная – длина цепи 954 мм;
 - ц) самоблокирующийся дифференциал повышенного трения – ВАЗ 1111 с модернизированным корпусом;
 - ч) передняя подвеска – двойные А-образные рычаги, тяга push rod;
 - ш) амортизаторы – Ohlins 25ТТХ;
 - щ) пружины – Cane creek 300x2.25”;
 - э) стабилизатор поперечной устойчивости –сталь 65 г, диаметр 10 мм;
 - ю) задняя подвеска – двойные А-образные рычаги, тяга push rod;
 - я) амортизаторы – Ohlins 25ТТХ;
 - а) пружины – Cane creek 300x2.25”;
 - б) стабилизатор поперечной устойчивости – сталь 65 г, диаметр 10 мм»
- [13].

3.2 Разработка концепции аэродинамических элементов

Разработка концепции перед началом проектирования элементов автомобиля является одним из наиболее важных и ответственных этапов в процессе создания транспортного средства, поскольку именно на этом этапе закладываются основные идеи, направления и стратегические решения,

определяющие дальнейший успех всего проекта [8]. Создание четкой и продуманной концепции позволяет сформировать ясное представление о конечном результате, определить ключевые параметры и требования к будущему автомобилю или его отдельным компонентам, а также установить приоритеты в разработке [6]. В процессе разработки концепции инженеры и дизайнеры анализируют целевую аудиторию, рыночные тенденции, конкурентные преимущества и уникальные особенности будущего продукта, что помогает сформировать его уникальный образ и позиционирование. Это особенно важно для того, чтобы обеспечить соответствие автомобиля ожиданиям потребителей, требованиям безопасности, экологическим стандартам и нормативам.

Разработка концепции способствует систематизации идей и предотвращает хаотичные решения на последующих этапах проектирования. Она помогает определить основные технические характеристики, такие как размеры, формы, материалы, технологические решения и функциональные возможности. Благодаря этому можно избежать ошибок, связанных с неправильным выбором архитектуры или технологий, что в дальнейшем может привести к значительным затратам времени и ресурсов на исправление ошибок или переделки. Кроме того, четко сформулированная концепция служит ориентиром для всей команды разработчиков – инженеров, дизайнеров, технологов – обеспечивая согласованность действий и единое понимание целей проекта.

Разработка концепции также позволяет заранее оценить возможные риски и ограничения проекта: например, связанные с производственными возможностями или стоимостью материалов. Это дает возможность скорректировать идеи на ранних стадиях и выбрать оптимальные решения с точки зрения эффективности и экономической целесообразности. В результате создается прочная основа для дальнейшего проектирования элементов автомобиля – от кузова до систем подвески или электроники – что способствует сокращению сроков разработки, снижению затрат и

повышению качества конечного продукта. Таким образом, разработка концепции перед началом проектирования является фундаментальным этапом, который обеспечивает стратегическую направленность работы всей команды и залог успешной реализации инновационных и конкурентоспособных автомобильных решений.

На рисунке 25 можно увидеть схематичную концепцию нового аэродинамического комплекта для гоночного болида класса «Формула Студент».

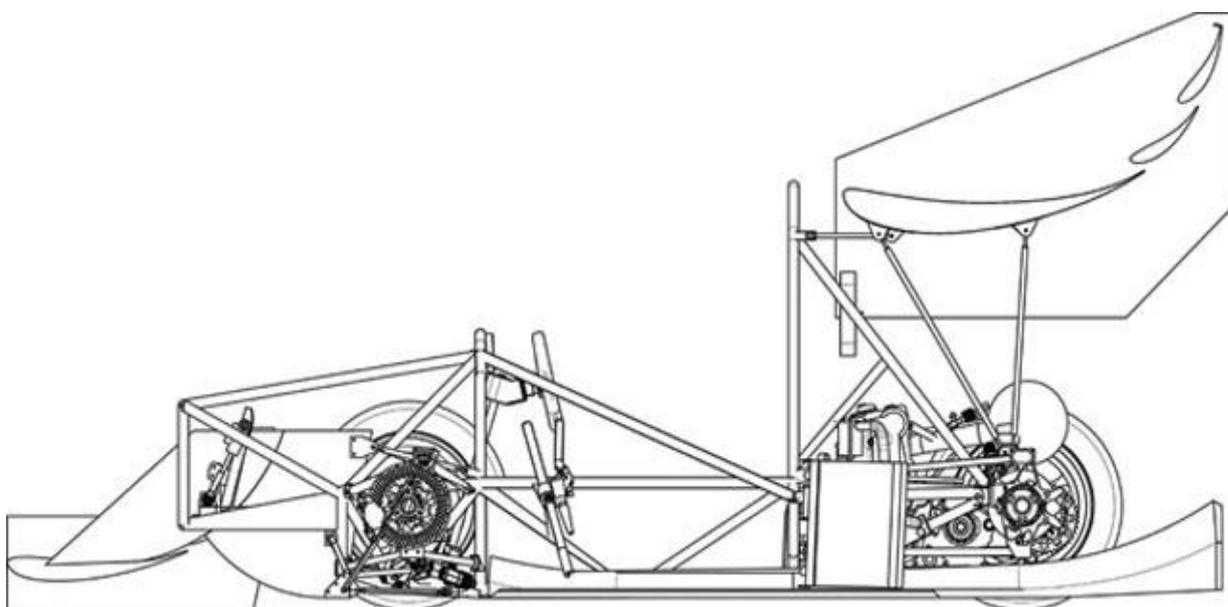


Рисунок 25 – Концепция аэродинамического комплекта для гоночного болида класса «Формула Студент»

Можно увидеть, что новая концепция включает в себя все возможные аэродинамические элементы, такие как переднее антикрыло, чтобы увеличить прижимную силу на передней оси, боковые понтоны, а также полноценное аэродинамическое дно для увеличения прижимающей силы на обе оси, но в большей степени на задней оси, а также заднее антикрыло с регулируемыми подкрылками для регулировки силы сопротивления воздушного потока.

До этого у команды уже имелся определенный опыт в разработке и

изготовлении переднего антикрыла, боковых диффузоров, а также заднего антикрыла, однако с аэродинамическим дном команда еще не работала. Поэтому на этапе подготовке к проектированию была предложена концепция аэродинамического дна, которая без проблем могла бы быть установлена на элементы шасси гоночного болида класса «Формула Студент». На рисунке 26 можно увидеть концепцию аэродинамического дна.

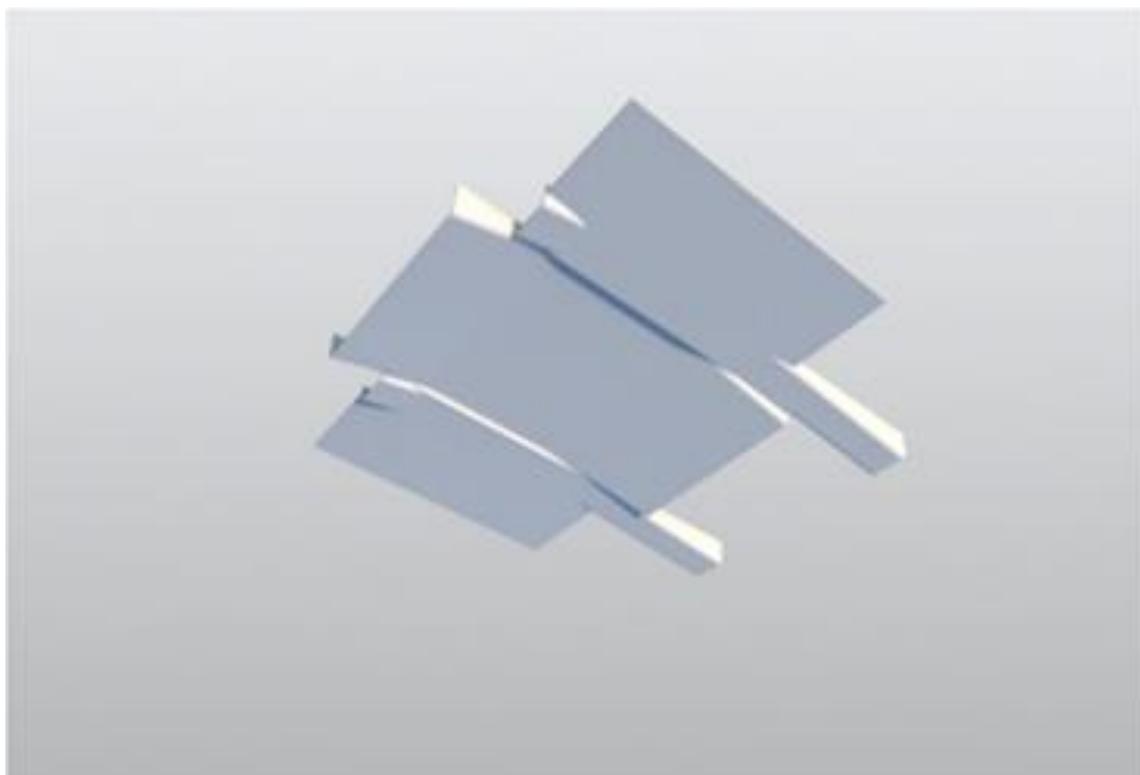


Рисунок 26 – Концепцию аэродинамического дна для гоночного болида класса «Формула Студент»

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены основные теоретические аспекты в проектировании подвески, влияющие на поведение автомобиля во время выполнения маневром. Также были рассмотрены упругие и жесткостные характеристики подвески, и как они влияют на управляемость.

4 Валидация эффективности концепции аэродинамического обвеса для болида класса «Формула Студент»

4.1 Описание ПО «АНСИС»

ANSYS – это мощная инженерная программная платформа, предназначенная для проведения компьютерного моделирования и анализа различных физических явлений, таких как механика, теплопередача, электромагнетизм и гидродинамика. Эта программа широко используется в инженерной практике и научных исследованиях для проектирования, оптимизации и проверки различных технических систем и устройств. Основная цель ANSYS – помочь инженерам и исследователям предсказать поведение конструкций и систем в реальных условиях без необходимости дорогостоящих физических прототипов и экспериментов.

Программа ANSYS включает в себя набор модулей, каждый из которых предназначен для решения конкретных задач. Например, ANSYS Mechanical используется для анализа структурных нагрузок, деформаций и прочности конструкций; ANSYS Fluent – для моделирования потоков жидкости и газа; ANSYS HFSS – для электромагнитных расчетов; а также модули для тепловых расчетов, акустики и мульти физического моделирования. Благодаря интеграции различных физических моделей в одной платформе ANSYS позволяет проводить комплексные симуляции, учитывающие взаимодействие нескольких факторов.

Использование ANSYS значительно сокращает время разработки новых продуктов, повышает их надежность и эффективность за счет выявления потенциальных проблем на ранних этапах проектирования. Программа широко применяется в аэрокосмической, автомобильной, энергетической, электронной промышленности и других областях, где важна точность моделирования сложных физических процессов. В целом, ANSYS является незаменимым инструментом для инженеров и ученых, стремящихся

к инновациям и оптимизации своих решений с помощью современных методов численного моделирования.

В данном случае нас интересует именно расчетный модуль ANSYS Fluent, который позволяет проводить так называемые продувки автомобиля, или же отдельных компонентов.

ANSYS Fluent – это специализированный модуль программной платформы ANSYS, предназначенный для моделирования и анализа потоков жидкости и газа с помощью методов численного гидродинамического моделирования (CFD – Computational Fluid Dynamics). Этот модуль позволяет инженерам и исследователям создавать точные виртуальные модели сложных течений, учитывать взаимодействие жидкостей с твердыми поверхностями, а также моделировать теплопередачу, химические реакции и другие физические процессы, связанные с движением жидкостей. Основная задача ANSYS Fluent – помочь понять поведение жидкостей в различных условиях, предсказать их влияние на конструкции и оптимизировать проектные решения без необходимости проведения дорогостоящих физических экспериментов.

Работа ANSYS Fluent основана на решении уравнений Навье-Стокса, которые описывают движение вязких жидкостей и газов. Пользователь задает геометрию исследуемой области, определяет граничные условия, свойства материалов и параметры течения. После этого программа разбивает модель на сетку – множество мелких элементов, внутри которых происходит численное решение уравнений. В процессе расчетов Fluent использует различные численные методы для получения распределения скоростей, давления, температуры и других параметров по всему объему модели. В результате пользователь получает детальные карты потоков, что позволяет выявить зоны турбулентности, вихрей, областей с высоким нагревом или охлаждением и другие важные характеристики.

В автомобилестроении ANSYS Fluent широко применяется для анализа аэродинамических характеристик транспортных средств. Например, с его

помощью можно моделировать поток воздуха вокруг кузова автомобиля для снижения сопротивления воздуха (аэродинамического сопротивления), что способствует уменьшению расхода топлива и повышению скорости. Пример можно увидеть на рисунке 27.

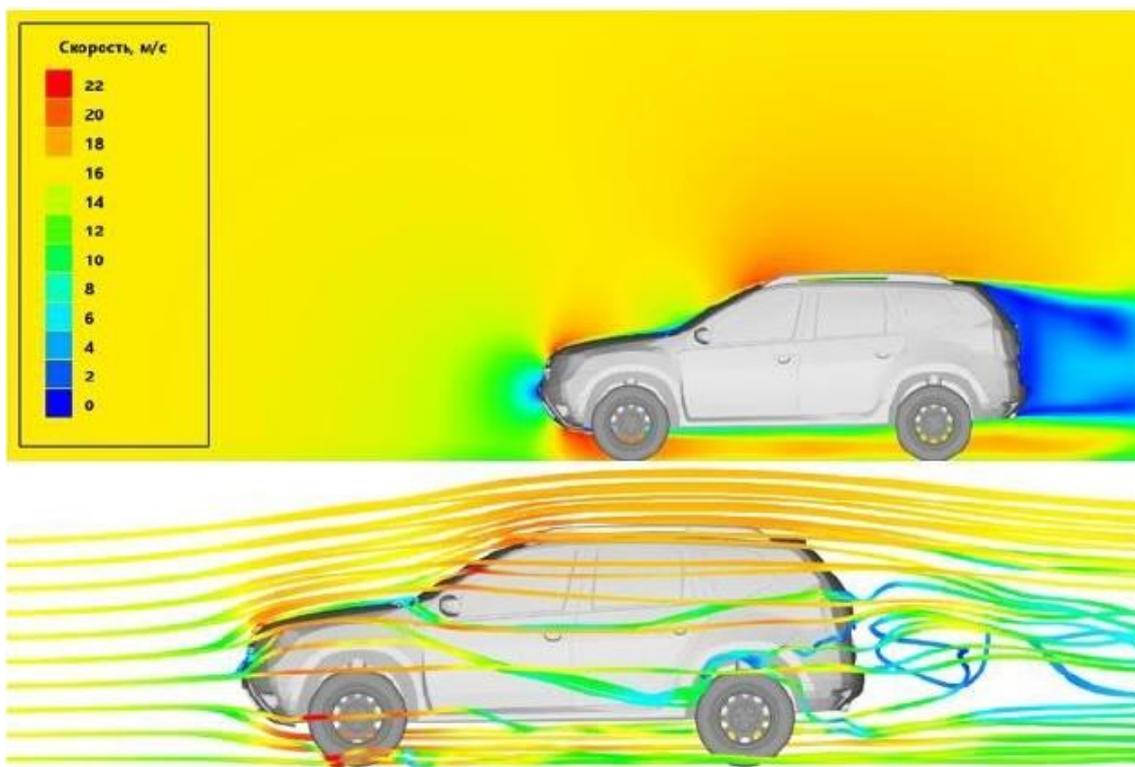


Рисунок 27 – Симуляция воздушных потоков в модуле ANSYS Fluent для проверки аэродинамичности транспортного средства

Также Fluent используется для оптимизации систем вентиляции внутри салона автомобиля, моделирования теплообмена в двигателе или системе охлаждения двигателя и трансмиссии. Благодаря точным расчетам потоков воздуха или жидкостей внутри систем автомобиля инженеры могут выявлять узкие места в конструкции, разрабатывать более эффективные формы деталей и систем охлаждения или вентиляции. Кроме того, CFD-анализ помогает предсказать поведение автомобиля при различных условиях эксплуатации – например, при движении на высокой скорости или в сложных погодных условиях – что способствует повышению безопасности и комфорта

водителя и пассажиров.

ANSYS Fluent является мощным инструментом для проведения комплексных гидродинамических расчетов в автомобилестроении. Он позволяет моделировать реальные условия эксплуатации транспортных средств, оптимизировать их аэродинамические показатели и системы охлаждения или вентиляции. Использование этого модуля помогает снизить затраты на прототипирование и испытания, ускорить цикл разработки новых моделей автомобилей и повысить их качество за счет точного предсказания поведения воздуха внутри и вокруг транспортных средств.

На рисунке 28 можно увидеть пример симуляции аэродинамического профиля крыла.

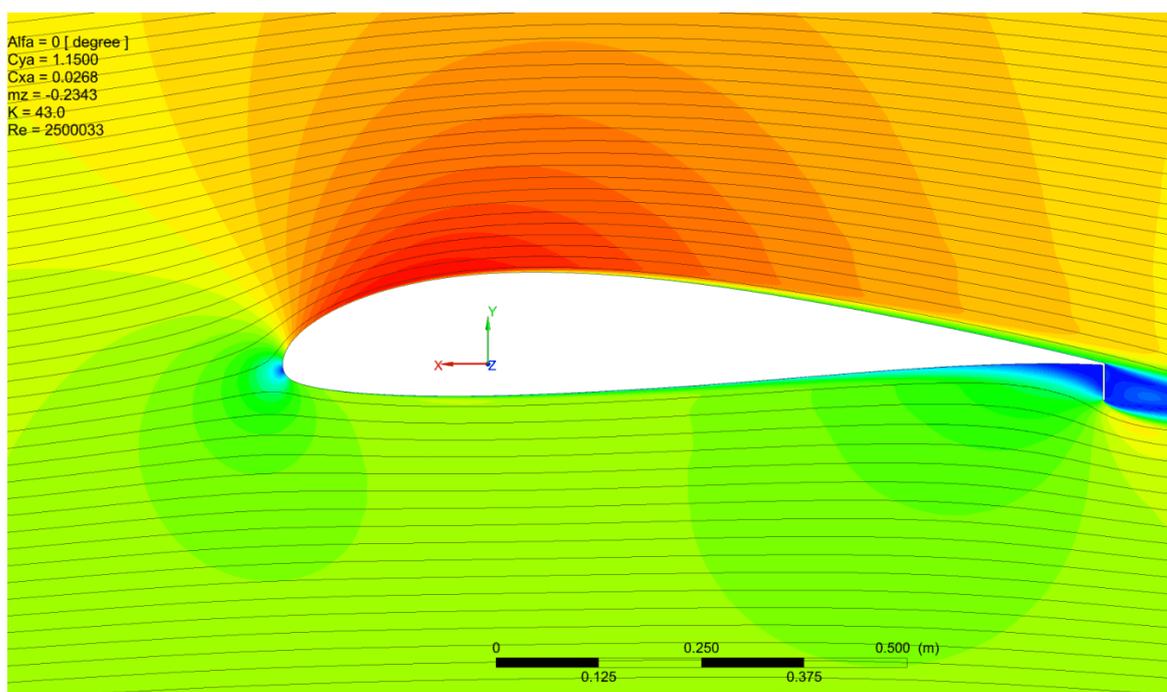


Рисунок 28 – Симуляция воздушных потоков в модуле ANSYS Fluent для проверки аэродинамичности крыла

Проведение симуляции аэродинамики автомобиля в модуле ANSYS Fluent включает несколько последовательных этапов, начиная с подготовки модели и заканчивая анализом полученных результатов. В первую очередь необходимо создать или импортировать трехмерную геометрию автомобиля,

которая должна точно отражать его реальные размеры и формы. После этого выполняется подготовка сетки – процесса дискретизации модели на множество мелких элементов, внутри которых будут решаться уравнения гидродинамики. Важно обеспечить достаточную детализацию в областях с ожидаемыми сложными потоками, например, зазорах между кузовом и колесами, зеркалами или в области заднего антикрыла, чтобы получить точные результаты.

Далее задаются граничные условия: указывается скорость входящего воздуха (например, скорость движения автомобиля), параметры окружающей среды (температура, давление), а также свойства воздуха и других материалов. Важным этапом является выбор модели турбулентности – чаще всего используют модели типа $k-\epsilon$ или $k-\omega$ для учета турбулентных эффектов, что позволяет правильно моделировать вихревые потоки и зоны турбулентности вокруг автомобиля. После этого запускается расчет – численное решение уравнений Навье-Стокса по всей сетке. В процессе расчетов Fluent вычисляет распределение скоростей, давления и температуры по всему объему модели.

По завершении расчетов пользователь получает результаты в виде графиков и визуализаций: распределения давления по поверхности кузова, линий тока воздуха, зон с высоким сопротивлением или турбулентностью. Анализ этих данных позволяет определить коэффициент сопротивления воздуха (C_d), выявить области с высоким сопротивлением или возможными зонами турбулентных вихрей, которые увеличивают сопротивление и снижают эффективность автомобиля. На основе полученных результатов инженеры могут вносить изменения в дизайн кузова – сглаживать острые углы, изменять форму зеркал или заднего спойлера – чтобы снизить аэродинамическое сопротивление и повысить топливную эффективность.

Таким образом, симуляция аэродинамики автомобиля в ANSYS Fluent – это комплексный процесс, включающий подготовку геометрии и сетки, настройку физических моделей и условий эксплуатации, проведение

численных расчетов и последующий анализ результатов. Этот подход позволяет получить глубокое понимание поведения воздушных потоков вокруг транспортного средства и способствует разработке более эффективных и аэродинамически оптимизированных моделей автомобилей [7].

4.2 Проведение симуляций для определения эффективности работы аэродинамического обвеса

На этапе разработки были проведены симуляции для проверки эффективности системы в целом, а также проверка работоспособности каждого объекта в системе, включая продувку аэродна, переднего и заднего антикрыльев.

Симуляции проводились в программном обеспечении Fluent. В качестве расчетной схемы выбраны скорости 80 км/ч, 60 км/ч и 36 км/ч, что обусловлено максимальной скоростью на трассе в рамках соревнований «Формула Студент», средней скоростью и скоростью выхода из поворота, соответственно.

Для этих условий была спроектирована 3D-модель аэродинамического пакета, на которую впоследствии была наложена конечно-элементная сетка. В результате продувок и их анализа были получены результаты эффективности работы аэродинамического обвеса на разных скоростях.

Переднее антикрыло является первым элементом, взаимодействующим с воздушным потоком. Его основная функция – создание прижимной силы на передней оси автомобиля. Оно также направляет воздушный поток к остальным элементам машины, снижая турбулентность и улучшая эффективность заднего крыла и диффузора. В нашей конструкции переднее крыло играет важную роль в распределении воздушного потока на начальном этапе взаимодействия с кузовом, снижая сопротивление и обеспечивая высокую прижимную силу за счет малого дорожного просвета.

На рисунке 29 показана полученная сетка для аэродинамических продувок аэродна.

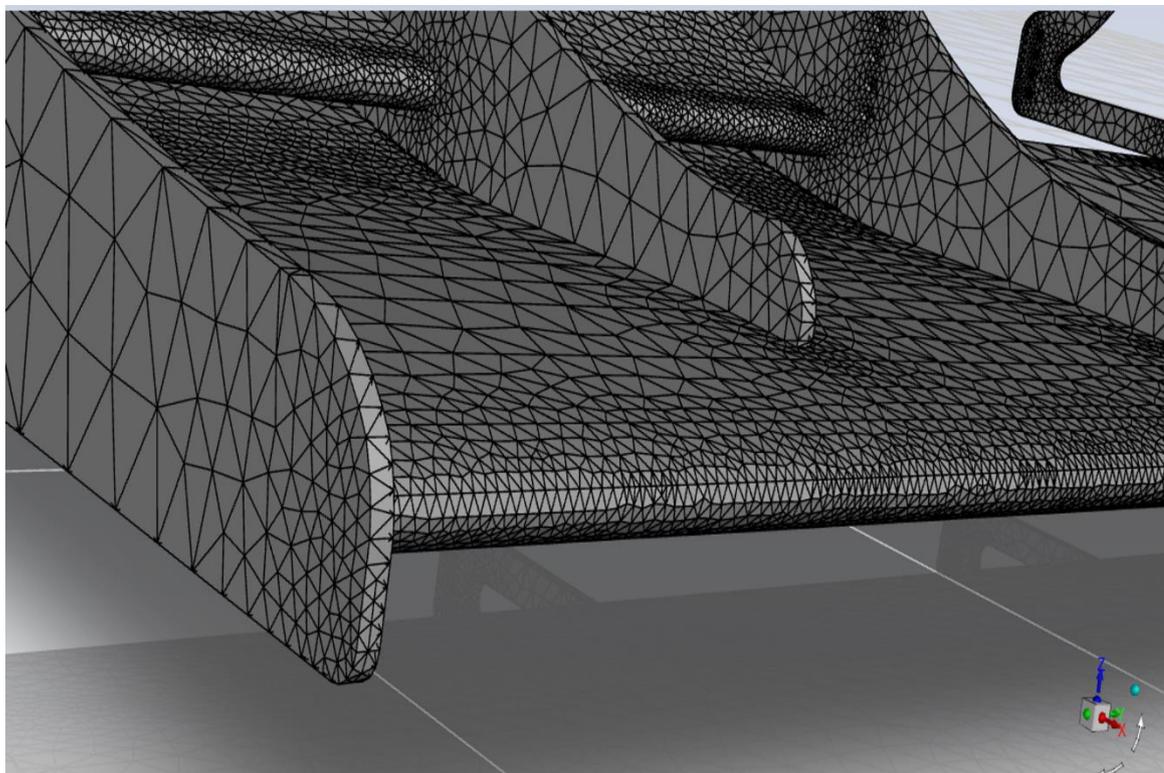


Рисунок 29 – Сетка для аэродинамических продувок аэродна

На всем переднем антикрыле был использован аэродинамический профиль GOT 137, показанный на рисунке 30.

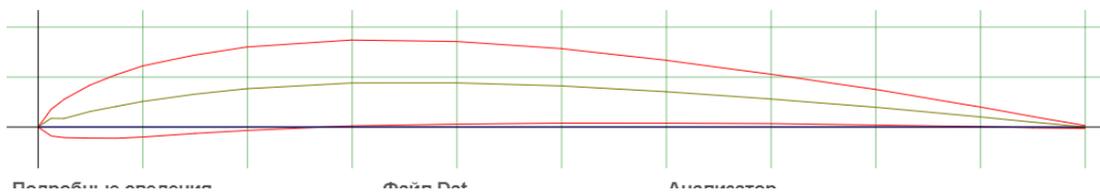


Рисунок 30 – Используемый профиль GOT 137

В результате проведенных симуляций были получены потоки воздуха, как показано на рисунке 31.

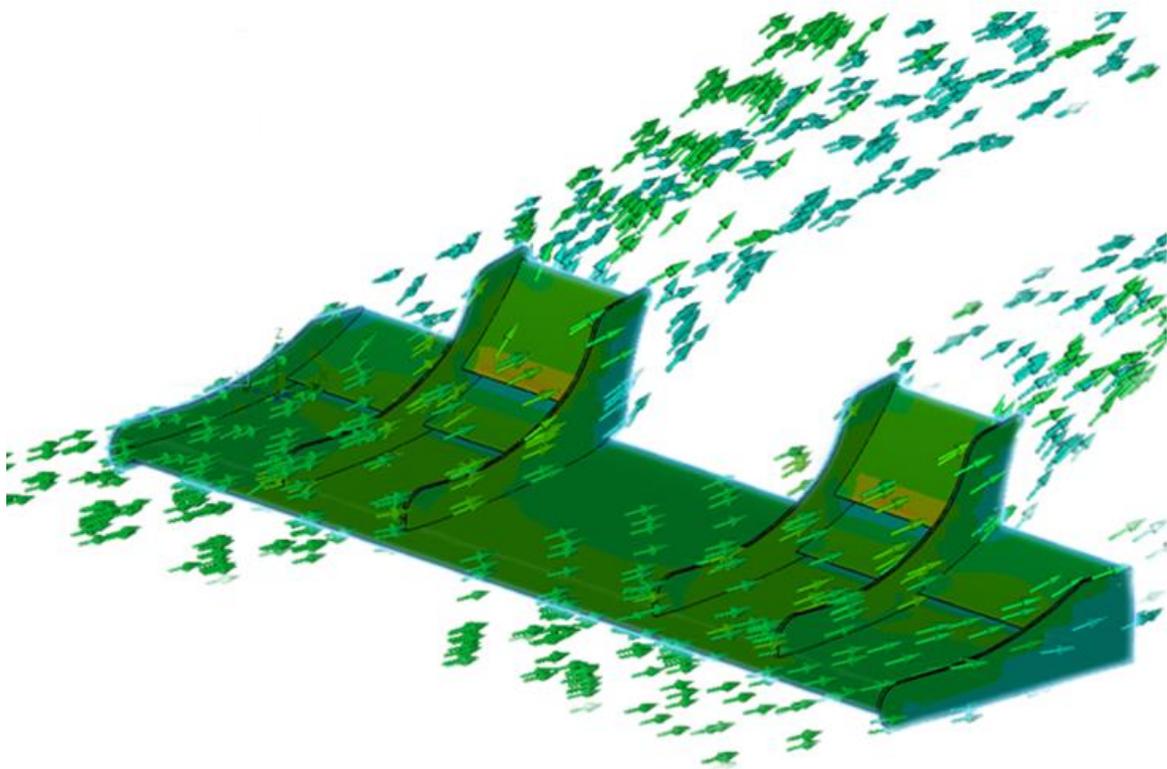


Рисунок 31 – Направления потоков, полученные в результате симуляции

Заднее антикрыло отвечает за создание значительной прижимной силы на задней оси автомобиля. Оно помогает улучшить сцепление колес с дорогой, обеспечивая лучшую управляемость и устойчивость на высоких скоростях. Эффективная конструкция заднего крыла также помогает минимизировать аэродинамическое сопротивление, повышая общую скорость автомобиля.

S-образные каналы заднего антикрыла позволяют поглощать турбулентный воздух и направлять его в ту сторону, где он нанесет меньший ущерб аэродинамическим характеристикам.

Перед нами была поставлена задача оптимизации заднего антикрыла для увеличения прижимной силы, а также снижения массы элемента. Для этого был проведен ряд исследований, а также несколько итераций разработки концепции профиля и формы заднего антикрыла. Кроме того,

были проведены симуляции каждого из вариантов для определения оптимальной формы. На рисунке 32 можно увидеть варианты заднего антикрыла, проработанные во время проектирования.

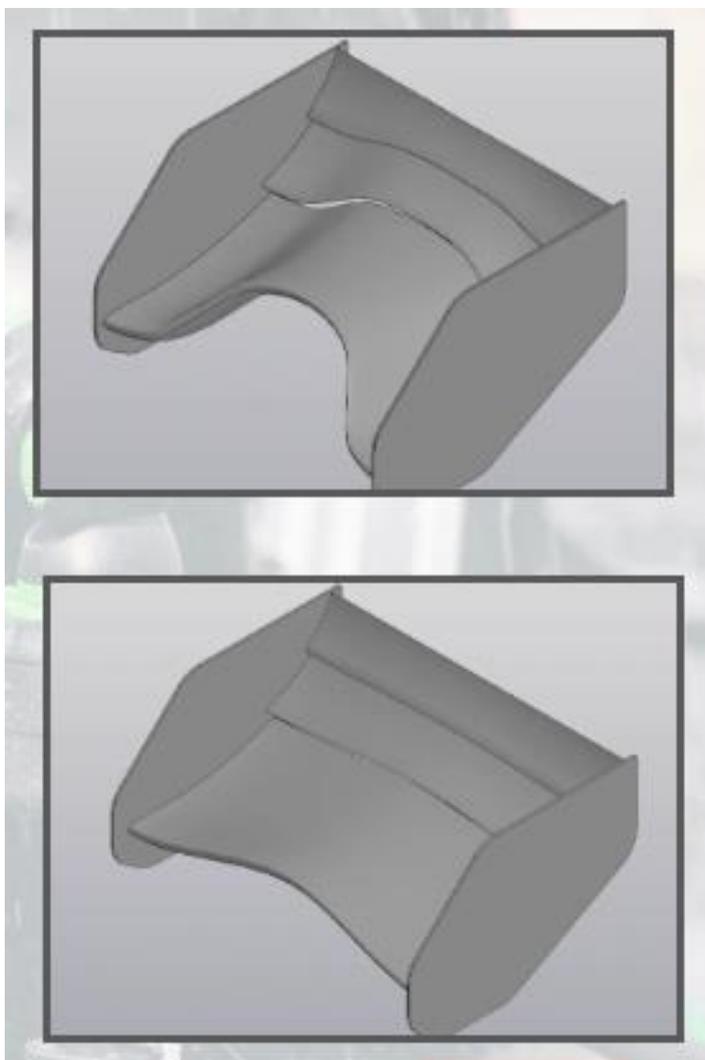


Рисунок 32 – Варианты заднего антикрыла

А на рисунке 33 можно увидеть каким образом проводилась симуляция прижимной силы заднего антикрыла.

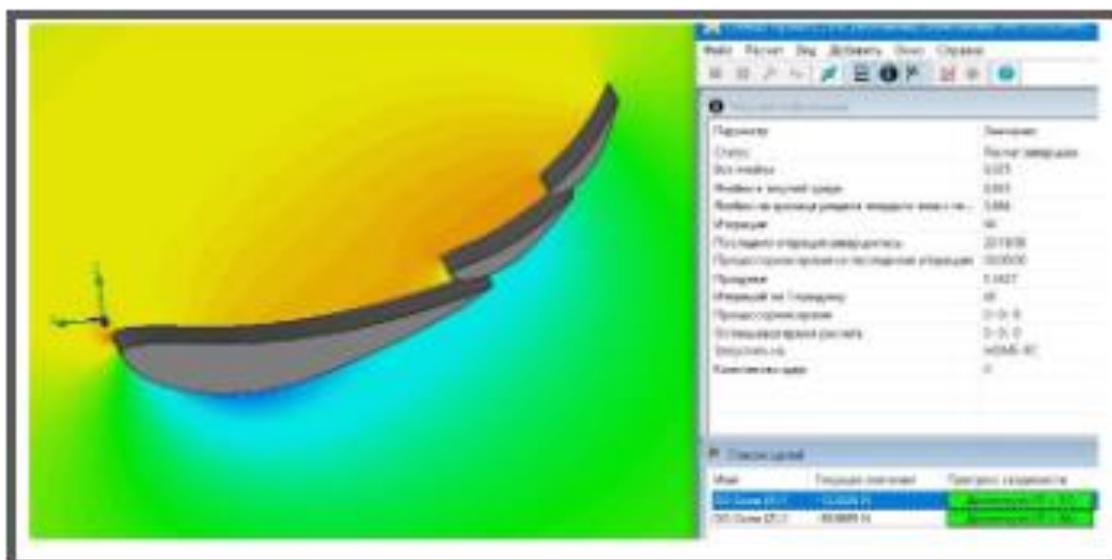


Рисунок 33 – Симуляция заднего антикрыла

Принцип работы аэродинамики известен как *ground effect* и основывается на принципе Бернулли, который гласит, что если скорость непрерывного потока газа или жидкости возрастает, то давление в нем убывает. Следовательно, прижимная сила создается за счет уменьшения давления. Диффузор помогает в создании прижимной силы под поддоном и расширяет воздух под автомобилем, вызывая снижение давления.

Угол наклона диффузора относительно земли влияет на величину создаваемой прижимной силы, поэтому желательно иметь наибольший угол наклона без разделения потока. Как только происходит разделение потока, прижимная сила уменьшается, и значительно возрастает лобовое сопротивление.

В ходе опытно-конструкторских работ был определен оптимальный угол наклона диффузора – 10 градусов. После определения угла наклона была создана форма аэродинамики с тремя предусмотренными туннелями и прогрессивной прямой на поддоне.

Такое решение было выбрано по двум причинам:

- создать постепенное изменение площади поверхности между землей и поддоном, что предотвращает разделение потока;
- обеспечить максимально возможный поток воздуха к радиатору для эффективной системы охлаждения.

После разработки 3D-модели был проведен анализ воздушного потока под аэродном с помощью программного обеспечения. На рисунке 34 показана сетка для аэродинамических продувок.

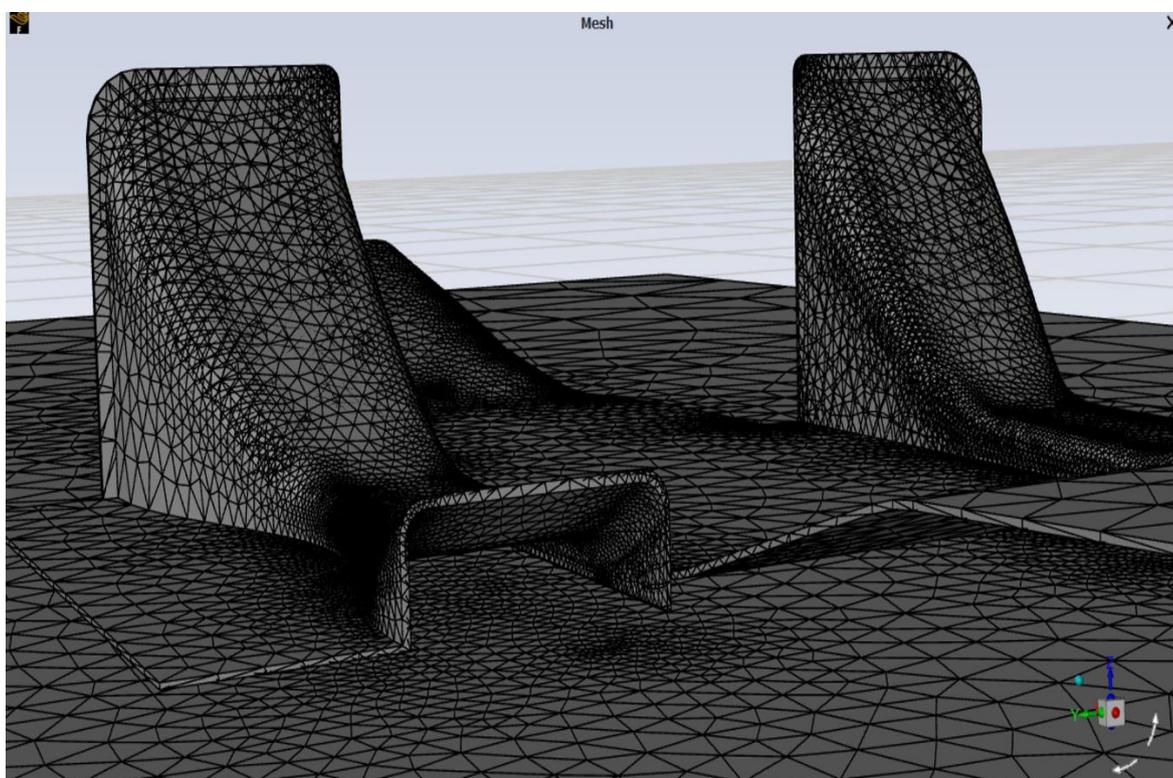


Рисунок 34 – Сетка для аэродинамических продувок аэродна

На рисунке 35 можно наблюдать, что области низкого давления видны на впуске и выпуске аэродна.

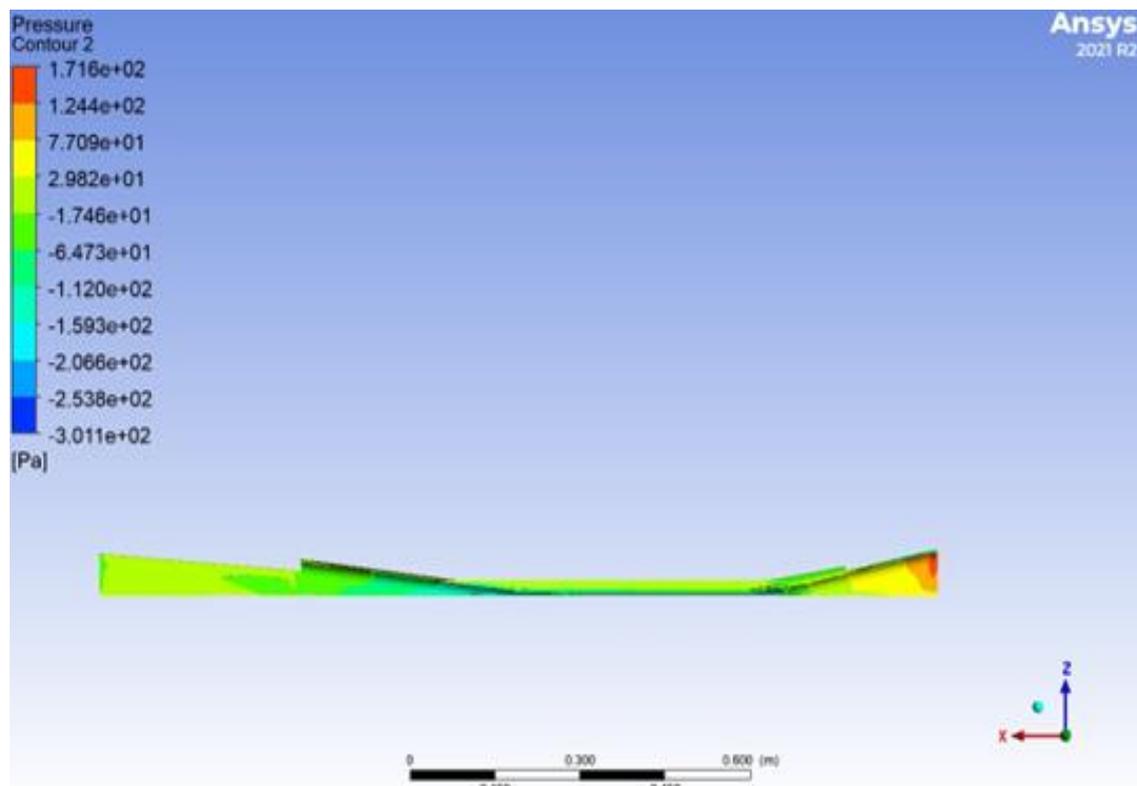


Рисунок 35 – Контуры давления аэродна

Давление в области между передней и задней частью аэродна ниже, следовательно, в этом месте создается большая прижимная сила.

Следующим шагом является проведение симуляции полноценной сборки гоночного болида класса «Формула Студент» со всем навесным аэродинамическим комплектом для того, чтобы убедиться, что аэродинамический комплект действительно правильно работает в составе сборки автомобиля, а также убедиться в том, что оптимизационные работы действительно были проведены не зря, и аэродинамический комплект на новом гоночном болиде будет работать эффективнее, чем на предыдущей версии.

Для того, чтобы провести симуляцию аэродинамических элементов в составе гоночного болида класса «Формула Студент», необходимо подготовить твердотельную 3Д модель автомобиля.

Чаще всего симуляции крупногабаритных элементов очень загружают

процессор и память компьютера, из-за чего проведение симуляции может оказаться долгим, и, возможно, безрезультатным. Чаще всего в таких случаях самым простым способом является изготовление упрощенной твердотельной 3Д модели. В нашем случае был применен именно такой способ упрощения симуляции, а именно создание упрощенной твердотельной 3Д модели гоночного болида класса «Формула Студент».

На рисунке 36 можно увидеть упрощенную твердотельную 3Д модель гоночного болида класса «Формула Студент».

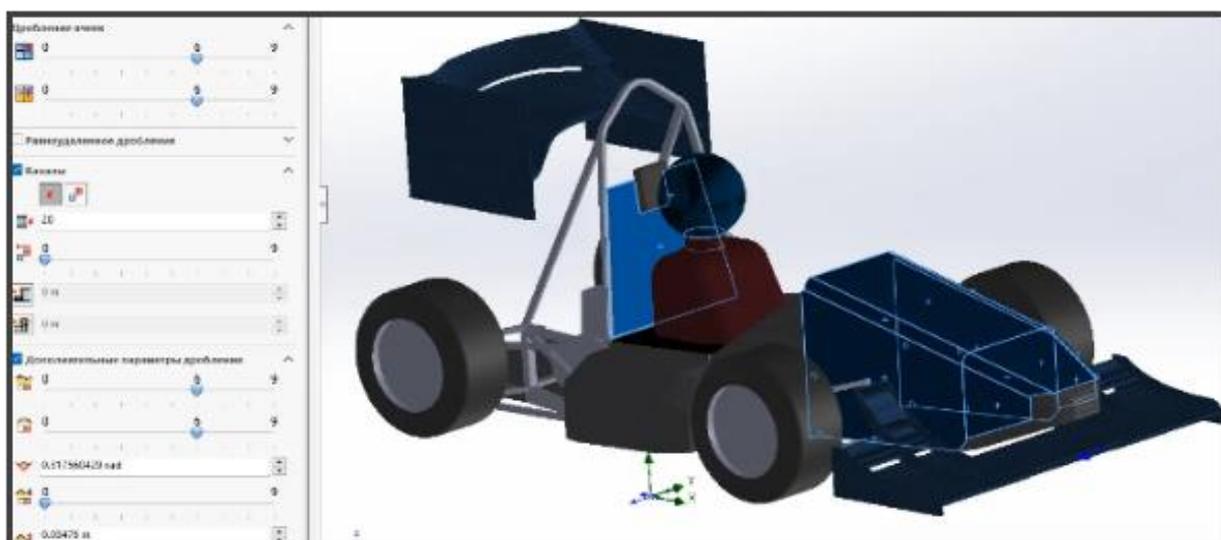


Рисунок 36 – Упрощенная твердотельная 3Д модель гоночного болида класса «Формула Студент»

Далее, когда упрощенная 3д модель гоночного болида готова, начинается процесс подготовки к проведению симуляции. Модель должна быть подготовлена к созданию тетраэдральной сетки, а для этого модель должна исключать различные самопересечения элементов и тел, а также модель не должна иметь микроскопические зазоры между элементами, и только в таком случае можно получить готовую тетраэдральную сетку без возникновения каких-либо ошибок.

После того, как тетраэдральная сетка готова, необходимо задать все граничные условия для проведения симуляции в модуле ANSYS Fluent. Это

должны быть данные об окружающей среде, о плотности воздуха, о погодных условиях, о материалах аэродинамических элементов, о скорости движения автомобиля. Все эти параметры очень важны для получения репрезентативного результата, который будет иметь большое сходство с реальной жизнью.

На рисунке 37 можно увидеть симуляцию потоков воздуха в противоположном направлении движению гоночного болида класса «Формула Студент»

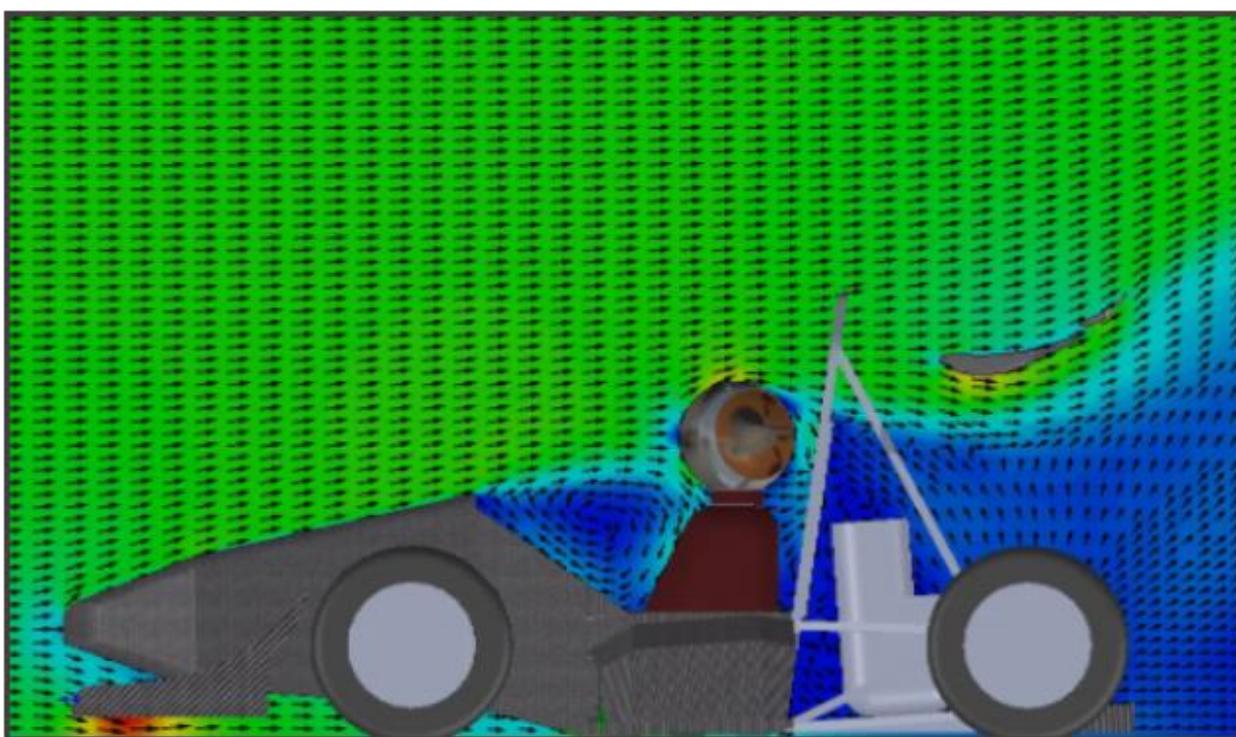


Рисунок 37 – Симуляция потоков воздуха в противоположном направлении движению гоночного болида класса «Формула Студент»

Выводы по разделу

В данном разделе был описан процесс разработки и оптимизации конструкции аэродинамических элементов при помощи итерационного моделирования и проведения различных симуляций, направленных на выявление эффективности работы профиля.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе выполнена разработка аэродинамического обвеса для гоночного болида класса «Формула Студент». В рамках исследования были проведены компьютерные симуляции в программном комплексе ANSYS Fluent, что позволило получить детальное представление о потоках воздуха и аэродинамических характеристиках конструкции.

Был осуществлен сравнительный анализ существующих решений аэродинамических обвесов команд-участников международных соревнований, а также изучены требования регламента к конструкции и безопасности гоночных автомобилей данного класса. На основе полученных данных сформирована концепция нового аэродинамического обвеса, учитывающая оптимизацию прижимной силы и снижение сопротивления воздуха.

В процессе работы создана трехмерная модель обвеса, выполнена его оптимизация с помощью методов численного моделирования в ANSYS Fluent. Проведены симуляции для оценки влияния конструкции на прижимную силу, сопротивление движению и стабильность автомобиля на различных скоростях и углах наклона трассы.

Результаты моделирования показали значительное увеличение прижимной силы без существенного роста сопротивления воздуха, что способствует повышению сцепления колес с дорогой и улучшению управляемости болида. Полученные данные были использованы для изготовления прототипа аэродинамического обвеса, который был установлен на гоночный автомобиль команды Тольяттинского государственного университета G5.

Апробация полученных результатов проводилась в рамках инженерных гоночных соревнований «Формула Студент» в ходе прохождения динамических испытаний.

Список используемых источников

1. Антошкина В.А. Проектирование системы подвески гоночного автомобиля Formula Student // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Механика и машиностроение. 2016. С. 44–47.
2. Вахламов, В. К. Автомобили : конструкция и эксплуатационные свойства : учеб. пособие для вузов / В. К. Вахламов. - М. : Академия, 2009. - 480 с. : ил. - (Выш. проф. образование. Транспорт). - Библиогр.: с. 475. - ISBN 978-5-7695-4202-2:
3. Вахламов, В. К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей : учеб. пособие / В. К. Вахламов. - Гриф УМО. - Москва: Академия, 2007. - 557 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 551. - ISBN 978-5-7695-3793-6: 323-00.
4. Вишняков Н.Н., Вахламов А.Н. Автомобиль: Основы конструкции: учеб, для ВУЗов специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» 2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986, 304 с.
5. Волкова Е.И., Двоглазова Н.А. Методика расчёта бизнес-презентации в рамках проекта Formula Student // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты". 2017. С. 198-204.
6. Волкова Е.И., Шерстобитова О.О. Разработка пространственной рамы для гоночного болида Black Bullet // VII выпуск журнала "Точная наука". 2017. С. 18-20.
7. Дьяков И.Ф., Оптимальный выбор подвески транспортных средств // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. Механика и машиностроение. 2020. С. 148–154.
8. Дэс Хаммилл. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль // пер. с англ. М. : Легион-Автодата, 2005. 96 с.
9. Кисуленко Б.В. Краткий автомобильный справочник. М. : Автополисплюс, 2005. 560 с.

10. Лукин П. П. Конструирование и расчет автомобиля: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобили и тракторы» / П. П. Лукин, Г. А. Гаспарянц В. Ф. Родионов – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
11. Маркина А.А., Чепкасов С.Н., Бережная М.А. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2019. С. 1–12
12. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2003. 782 с.
13. Маталин А. А. Технология машиностроения: учеб.для студ. вузов, обуч. по спец. 151001 напр. "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроит. производств". Изд. 3-е, стер. ; Гриф УМО. Санкт-Петербург : Лань, 2010. 512 с.
14. Петрова М.С. Охрана труда на производстве и в учебном процессе: учеб. пособие. М. : ЭНАС, 2006. 232 с.
15. Раймпель Й. Шасси автомобиля / под. ред. И. Н. Зверева. М. : Машиностроение, 1983. 356 с.
16. Рассадкин Н.А., Шорников Д.А., Агго С.Д., Пляшко А.Н. Влияние различных факторов на управляемость автомобиля // Colloquium-journal. 2021. №3 (90). С. 55–57.
17. Родионов, В.Ф. Легковые автомобили [Текст] / В.Ф. Родионов, Б.А. Фиттерман. – М. : Машиностроение, 1973. – 490 с.
18. Свинов В.В. Моделирование динамики рулевого управления автомобиля // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2008. С. 110–111.
19. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 / под ред. А.Г. Косиловой. М. : Машиностроение, 1985, 496 с.
20. Суслов А. Г. Технология машиностроения: учеб. для вузов. М. : Машиностроение, 2007. 429 с.

21. Шерстобитова О.О., Мошко Д.А. Разработка модульной каркасно-сборочной технологической оснастки для производства элементов спортивно-гоночных автомобилей» // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты". 2017. С. 205–207.
22. Badih A. Jawad, Jason Baumann. Design of Formula SAE Suspension // Motorsport Engineering Conference & Exhibition Indianapolis, Indiana December. 2002. P. 2–5.
23. Formula SAE [Электронный ресурс] // URL: <http://www.fsaeonline.com/> (дата обращения: 15.04.2025).
24. Formula Student Germany [Электронный ресурс] // URL: <https://www.formulastudent.de/> (дата обращения: 25.04.2025).
25. Greg Wheatley, Brent Lane Design of a Rear Suspension for a Race Car // Engineering Letters Journal. 2020. P. 414–418.
26. Li Sun, Zhao Deng, Qing Zhang. Design and Strength Analysis of FSAE Suspension // The open Mechanical Engineering Journal. 2014. P. 414–418.
27. Popa C. 2005 Formula SAE-A Racer Car / University of Southern Queensland. 2005. P. 113–124.
28. Riley W. and George A. «Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis» / University of Cornwell. 2002. P. 85-88.
29. SAE Mobilus [Электронный ресурс] // URL: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/> (дата обращения: 14.03.2025).