

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)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Эксплуатация транспортных средств

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование влияния навесных аэродинамических элементов на прижимную силу болидов класса «Формула»

Студент М.О. Максимов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель канд. техн. наук, доцент А.В. Бобровский

(ученая степень, звание, И.О.Фамилия)

Тольятти 2022

## Содержание

Введение.....	4
1 Состояние вопроса .....	6
1.1 Особенности аэродинамики гоночного болида класса «Формула».....	6
1.2 Понятие прижимной силы.....	6
1.3 Сила сопротивления движения.....	8
1.4 Коэффициенты $C_L$ , $C_D$ .....	10
1.5 Теория крыльев.....	14
2 Существующие конструкции и типы аэродинамического обвеса для болида класса «Формула» .....	19
2.1 Носовой обтекатель .....	19
2.2 Переднее крыло .....	22
2.3 Заднее крыло.....	27
2.4 Диффузор .....	33
2.5 Боковые понтоны .....	37
2.6 Флип-апы.....	42
3 Распределение и баланс аэродинамических сил.....	44
4 Проведение теоретических расчетов перед этапом построения САД-модели .....	51
4.1 Расчет тягово-динамических характеристик автомобиля.....	51
4.2 Расчёт внешней скоростной характеристики автомобиля.....	54
4.3 Силовой баланс автомобиля .....	56
4.4 Динамическая характеристика болида.....	57
4.5 Мощностной баланс болида.....	58
4.6 Анализ аэродинамического профиля .....	60
5 Настройка CFD модели.....	62
5.1 Чистка геометрии .....	64
5.2 Создание жидкой области .....	65
6 Исследование влияния расчетных параметров аэродинамических элементов на прижимную силу .....	68
6.1 Модель без аэродинамического обвеса .....	68

6.2 Модель с аэродинамическим дном, диффузором и боковыми понтонами .....	74
6.3 Модель с полным аэродинамическим обвесом.....	80
6.4 Сравнение результатов .....	88
Заключение .....	92
Список используемых источников.....	94

## Введение

Аэродинамика — это наука о том, как воздух течет вокруг и внутри объектов. В более общем смысле ее можно назвать «гидродинамикой», потому что воздух на самом деле представляет собой очень разреженную жидкость. Выше нижнего порога скоростей поток воздуха вокруг автомобиля и через него начинает оказывать более выраженное влияние на ускорение, максимальную скорость, топливную экономичность и управляемость.

Следовательно, чтобы построить максимально эффективный гоночный автомобиль, необходимо понять и оптимизировать то, как воздух обтекает и проходит через корпус, его отверстия и его аэродинамические устройства. В настоящее время установлено, что аэродинамика играет ключевую роль в характеристиках и эффективности гоночного автомобиля с открытыми колесами, даже когда он движется по трассе на низких скоростях, как это делает автомобиль класса «Формула Студент».

Хорошо аэродинамически спроектированный автомобиль способен использовать окружающий его воздушный поток, чтобы создать как можно большую вертикальную силу по отношению к земле, сохраняя при этом силу сопротивления воздуха на низком уровне.

Вертикальная сила известна в автоспорте как прижимная сила, а сила сопротивления называется сопротивлением. Таким образом, сцепление с дорогой и, следовательно, производительность шин увеличиваются, и автомобиль может достигать более высоких скоростей прохождения поворотов при одновременном снижении расхода топлива благодаря уменьшенному сопротивлению воздуха.

Чтобы по соображениям безопасности поддерживать скорость транспортных средств на низком уровне, большинство трасс на нескольких соревнованиях «Формула Студент» состоят в основном из повторяющихся крутых поворотов и меньше из длинных прямых. Этот факт привел к тому, что большинство команд FSAE осознали, что гонку можно выиграть главным

образом за счет повышения характеристик своих автомобилей на поворотах. Это делает необходимость эффективной аэродинамической конструкции еще более важной из-за значительной разницы в скорости прохождения поворотов, что может помочь значительно сократить время круга автомобиля FSAE, в котором используются аэродинамические устройства.

Понимая это, наша команда Togliatti racing Team с самого момента своего основания стремится к разработке эффективного аэродинамического обвеса для своих гоночных болидов разных поколений.

Цель данной работы: исследовать различные методы проектирования и проведения расчетов аэродинамического обвеса болидов класса «Формула», учитывая теоретические аспекты вопроса, применить их в моделировании, подтвердить поставленные тезисы о влиянии аэродинамического обвеса на прижимную силу болида, разработать рекомендации по постройке и проектировке аэродинамических элементов для всех типов гоночных болидов с открытым колесом.

Задачи представленной работы:

- изучить теоретические аспекты расчетов аэродинамических элементов болида класса «Формула»,
- проанализировать характеристики и влияние каждого из аэродинамических элементов болида,
- проанализировать влияние различных конфигураций гоночного аэродинамического обвеса,
- рассмотреть программное обеспечение, используемое для моделирования и расчетов аэродинамических элементов, такие как: Solid-Works для построения CAD-модели, ANSA pre-processor для проведения подготовки модели к моделируемым расчетам, ANSYS Fluent для моделирования расчётов, и META post-processor для обработки полученных результатов.

## **1 Состояние вопроса**

### **1.1 Особенности аэродинамики гоночного болида класса «Формула»**

С каждым годом автомобили класса «Формула» становятся всё быстрее, а значит, что и их мощность соответственно растёт. Однако точно так же, как происходит потеря энергии от двигателя, передаваемой на трансмиссию и колеса, таким же образом существует и предел мощности, которую вы можете передать от шин на землю.

Чтобы увеличить этот нежелательный предел, необходимо приложить к колесам дополнительное усилие, направленное в сторону земли. Увеличение веса может помочь сделать это, но, как бы ни было печально, вес только ухудшает управляемость автомобиля и требует от него ещё большей мощности, а поскольку автомобили класса «Формула» ежегодно становятся всё легче, эта направленная вниз сила становится еще более важной. Уменьшая сопротивление (скольжение) автомобиля в воздухе, он может развивать более высокие максимальные скорости и быстрее двигаться по прямой, в то время как с правильной конструкцией формы его обвеса большое количество давления вниз (прижимная сила) может быть передано на шины и так машина будет еще быстрее проходить повороты.

Исследования в области аэродинамики позволили достичь скорости прохождения поворотов в «высокоскоростных» поворотах намного выше, чем та, которая возможна без использования аэродинамического обвеса, хотя и снизили предельные максимальные скорости, что не так уж важно для соревнований «Формула Студент».

### **1.2 Понятие прижимной силы**

Каждый объект, движущийся и прорезающий воздушное полотно, создает либо подъемную, либо прижимную силу. Крыло может заставить

самолет взлететь, но, если мы перевернем его, оно, наоборот, поможет заставить высокоскоростную гоночную машину оставаться на земле. Тот же принцип, который позволяет самолету отрываться от земли за счет создания подъемной силы его крыльев, используется в обратном направлении для приложения силы, которая прижимает гоночный автомобиль к поверхности трассы. Как правило, термин «подъемная сила» используется, когда речь идет о любом виде аэродинамической силы, действующей на поверхность.

Затем ему присваивается своего рода индикатор, либо «положительная подъемная сила» (вверх), либо «отрицательная подъемная сила» (вниз) относительно его направления, поскольку большинство аэродинамических обвесов были изобретены для самолетов и были разработаны для их подъема в воздух, примеры их работы представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Направление прижимной и подъемной сил

В аэродинамике гоночных автомобилей вертикальная нисходящая сила, обеспечиваемая аэродинамическим обвесом, установленным на гоночном автомобиле, прижимает шины к поверхности трассы, обеспечивая наилучшее сцепление, что, в свою очередь, обеспечивает более высокие скорости прохождения поворотов и более быстрое торможение. Сцепление между шинами и дорожным покрытием, которое обеспечивается исключительно аэродинамическими силами, называется «аэродинамическим сцеплением» и отличается от «механического сцепления», которое является функцией перераспределения массы автомобиля, шин и подвески.

Создание прижимной силы пассивными устройствами, такими как крылья, кузов, диффузоры и т. д., почти всегда может быть достигнуто только

за счет увеличения аэродинамического сопротивления (или трения), и оптимальная настройка зачастую является своеобразным компромиссом между ними [2]. Поскольку это свойство потока воздуха над автомобилем и под ним, а также поскольку аэродинамические силы увеличиваются пропорционально квадрату скорости, прижимная сила увеличивается пропорционально квадрату скорости автомобиля и требует определенной минимальной скорости для получения значительного эффекта.

### **1.3 Сила сопротивления движения**

Когда жидкость течет по поверхности, поверхность будет сопротивляться ее движению. В аэродинамике сопротивление — это сила сопротивления жидкости или газа, которая действует на любое движущееся твердое тело в направлении набегающего потока жидкости или газа. Аэродинамическое сопротивление гоночного автомобиля представляет собой сумму сопротивления трения, формы и давления.

Сопротивление трения возникает, когда частицы воздуха проходят по поверхности автомобиля, а слои частиц, ближайšie к поверхности, прилипают. Сопротивление трения кожи вызвано фактическим контактом частиц воздуха с поверхностью движущегося объекта. Слой над этими прикрепленными частицами скользит по ним, но, следовательно, замедляется неподвижными частицами на поверхности. Слои над этим замедленным слоем движутся быстрее.

По мере того, как слои удаляются от поверхности, они замедляются все меньше и меньше, пока не начнут течь со скоростью набегающего потока. Область низкой скорости, называемая пограничным слоем, появляется на каждой поверхности и вызывает один из трех типов сопротивления.

Сила, необходимая для смещения молекул воздуха в сторону, создает второй тип сопротивления, форму сопротивления. Из-за этого явления, чем меньше лобовая площадь транспортного средства, тем меньшая площадь



молекул должна быть сдвинута, и, следовательно, меньше энергии требуется для проталкивания воздуха. При меньшем усилии двигателя в движущемся воздухе больше уходит на движение автомобиля по трассе, и при заданной мощности двигателя автомобиль будет двигаться быстрее.

Сопротивление формы и сопротивление давления — это фактически один и тот же тип сопротивления. Разделение воздуха создает турбулентность и приводит к образованию карманов низкого и высокого давления, оставляющих за автомобилем след. Это препятствует движению вперед и является частью общего сопротивления. Обтекаемость движущегося объекта уменьшит сопротивление формы, а части гоночного автомобиля (в основном детали подвески), которые не поддаются обтеканию, заключены в крышки, называемые обтекателями. Итак, аэродинамическое сопротивление гоночного автомобиля показано на рисунке 2, состоит в основном из трех сил:

- фронтальное давление или эффект, создаваемый корпусом транспортного средства, отталкивающим воздух в сторону;
- вакуумирование или эффект, создаваемый воздухом, не способным заполнить отверстие, оставленное кузовом автомобиля;
- пограничный слой, или эффект трения, создаваемый медленно движущимся воздухом на поверхности кузова автомобиля.

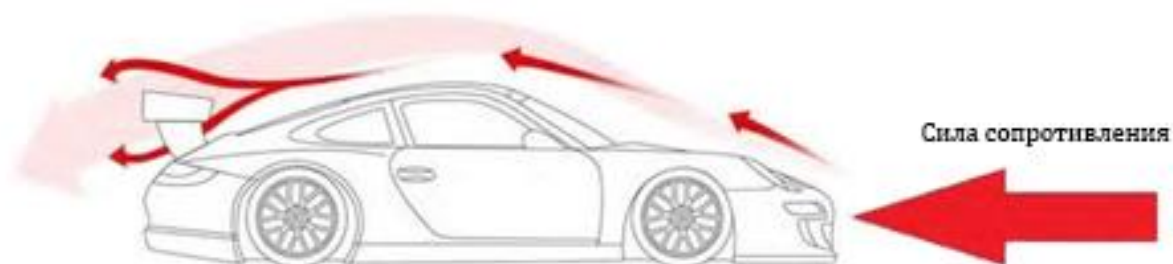


Рисунок 2 – Сила сопротивления, действующая на движущуюся гоночную машину

Отрыв потока относится только к «заднему разрежению» части сил сопротивления и оказывает все большее и большее негативное влияние по мере увеличения скорости транспортного средства.

На самом деле сопротивление увеличивается пропорционально квадрату скорости транспортного средства, поэтому требуется все больше и больше лошадиных сил, чтобы толкать транспортное средство по воздуху по мере увеличения его скорости. Поэтому, когда транспортное средство достигает высоких скоростей, становится важным спроектировать автомобиль так, чтобы ограничить области отрыва потока. Понимание взаимосвязи между скоростью и сопротивлением важно при расчете максимальной выносливости и запаса хода гоночного автомобиля. Когда сопротивление минимально, мощность, необходимая для преодоления сопротивления, также минимальна.

#### **1.4 Коэффициенты $C_L$ , $C_D$**

Коэффициент подъемной силы ( $C_L$ ,  $C_N$  или  $C_Z$ ) представляет собой безразмерный коэффициент, который связывает подъемную силу, создаваемую подъемным телом, с плотностью жидкости или газа вокруг тела, скоростью жидкости и соответствующей эталонной площадью [3].

Коэффициент подъемной силы — это самый простой способ, который используют в аэродинамике для представления очень сложных идей и моделирования всех сложных зависимостей формы, наклона и некоторых условий потока от подъемной силы.

Этот коэффициент выражает отношение подъемной силы к силе, создаваемой динамическим давлением, умноженной на площадь. Коэффициент подъемной силы часто определяется с помощью компьютерных моделей (CFD) или испытаний в аэродинамической трубе. В определенных диапазонах рабочих условий и при отсутствии сваливания коэффициент подъемной силы имеет постоянное значение, а производимая подъемная или прижимная сила пропорциональна квадрату воздушной скорости и может быть определена с помощью следующего уравнения:

$$L = \frac{1}{2} \times C_L \times \rho \times u^2 \times A \quad (1)$$

где  $L$  – подъемная сила,  
 $\rho$  – плотность жидкости,  
 $u$  – скорость потока,  
 $A$  – соответствующая площадь плана.

Коэффициент аэродинамического сопротивления ( $C_D$  или  $C_x$ ) является распространённой мерой в автомобильном дизайне, поскольку он относится к аэродинамике. Коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля влияет на то, как автомобиль проходит через окружающий воздух. Аэродинамическое сопротивление увеличивается пропорционально квадрату скорости, поэтому оно становится критически важным на более высоких скоростях [4].

Снижение коэффициента аэродинамического сопротивления автомобиля улучшает его характеристики в отношении скорости и топливной экономичности.  $C_D$  изменяется в зависимости от формы тела. Сила сопротивления изменяется в зависимости от  $C_D$  и направления потока, плотности и вязкости воздуха, размера объекта, скорости и пропорциональна плотности воздуха и квадрату относительной скорости между воздухом и объектом. Один из способов выразить это с помощью уравнения сопротивления:

$$D = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho \times u^2 \times A \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления [2].

Эталонная площадь  $A$  зависит от того, какой тип коэффициента лобового сопротивления измеряется. Для автомобилей и многих других объектов эталонной площадью является проекция передней части транспортного средства. Это не обязательно может быть площадь поперечного

сечения транспортного средства, в зависимости от того, где берется поперечное сечение.

Для аэродинамических профилей эталонной площадью является номинальная площадь крыла. Поскольку это имеет тенденцию быть большим по сравнению с лобовой площадью, результирующие коэффициенты сопротивления имеют тенденцию быть низкими, намного ниже, чем у автомобиля с таким же сопротивлением, лобовой площадью и скоростью.

На коэффициент аэродинамического сопротивления транспортного средства влияет форма кузова транспортного средства. Чтобы достичь низкого коэффициента сопротивления, пограничный слой вокруг тела должен оставаться прикрепленным к поверхности тела как можно дольше, в результате чего след становится узким. Высокое сопротивление формы приводит к широкому следу.

Пограничный слой будет переходить из ламинарного в турбулентный, если число Рейнольдса для обтекания тела достаточно велико. Более высокие скорости, более крупные объекты и более низкая вязкость способствуют увеличению числа Рейнольдса. Различные другие характеристики также влияют на коэффициент аэродинамического сопротивления, некоторые гоночные автомобили могут иметь более высокий коэффициент аэродинамического сопротивления, но это должно компенсировать величину подъемной силы, создаваемой транспортным средством, в то время как другие используют аэродинамику в своих интересах для увеличения скорости и имеют гораздо более низкие коэффициенты сопротивления.

Другие высокопроизводительные гоночные автомобили имеют удивительно высокий  $C_D$  из-за более широких шин, дополнительных крыльев и более крупных систем охлаждения, поскольку обычные автомобили имеют радиаторы половинного размера, а оставшаяся часть заглушена для уменьшения охлаждения и сопротивления моторного отсека [5].

Необходимо отметить о проблеме, которая возникает у всех специалистов по аэродинамике болидов класса «Формула». Проблема

заключается в исключительной разносторонности данного вопроса, а именно: специалисту необходимо найти правильный баланс между увеличением прижимной силы болида, и тем, какое лобовое сопротивление на него будет оказывать поток воздуха, ведь лобовое сопротивление создаёт эффект торможения об воздух, что наоборот может ухудшить положение болида на гоночном треке.

Неправильно подобранные настройки или ошибки в расчётах, могут стоить командам драгоценных очков или позиции, занимаемой в текущем рейтинге команд [1]. Примеры настроек представлены на рисунке 3.








Configuration	Description	$C_D$	$C_L$	$C_D/C_L$
	Без аэродинамического обвеса	0.63	0.29	0.46
	Диффузор и каналы на дне болида	0.65	-0.79	-1.21
	Каналы на дне болида и крылья	0.66	-1.28	-1.94
	Каналы на дне болида и крылья с боковыми вставками	0.68	-1.56	-2.29
	Каналы на дне болида и крылья с боковыми вставками и закрывками	0.90	-2.34	-2.60
	Каналы на дне болида и многокомпонентные крылья	0.98	-2.58	-2.63
	Изменённый размер днища авто и перекомпанованы крылья	1.30	-3.70	-2.85

Рисунок 3 – Коэффициенты аэродинамического сопротивления автомобиля класса формула с различными аэродинамическими обвесами

Каждая команда стремится уделить подбору и расчетам по аэродинамике особое место, ведь от неё зависит большое количество очков, в случае же соревнований типа F1, именно аэродинамический обвес зачастую

имеет ключевое значение, поскольку позволяет автомобилям развивать наибольшую скорость на прямых и поворотах. Также позволяет и позже выполнять торможение, проходить многие из затяжных поворотов в полный газ, в то время как команды с менее удачными конструкциями аэродинамического обвеса себе позволить такое не могут.

## **1.5 Теория крыльев**

Каждое крыло в разрезе имеет форму аэродинамического профиля. Низкоскоростные аэродинамические профили имеют характерную форму с закругленной передней кромкой, за которой следует острая задняя кромка, часто с симметричной кривизной верхней и нижней поверхностей. Геометрия аэродинамического профиля описывается тремя терминами.

Передняя кромка, которая является точкой в передней части аэродинамического профиля, которая имеет максимальную кривизну и минимальный радиус, задняя кромка, которая является точкой минимальной кривизны в задней части аэродинамического профиля, хорда, которая представляет собой прямую линию, соединяющую переднюю и заднюю части края аэродинамического профиля, как показано на рисунке 4.

Длина хорды — это длина линии хорды и эталонный размер сечения аэродинамического профиля. Форма стокового аэродинамического профиля определяется с помощью следующих двух геометрических параметров. Средняя линия выпуклости, которая представляет собой геометрическое место точек на полпути между верхней и нижней поверхностями, и распределение толщины, которое изменяется вдоль хорды. Наконец, два важных понятия, используемые для описания поведения аэродинамического профиля при движении через жидкость или газ: аэродинамический центр, который представляет собой длину по хорде, вокруг которой момент тангажа не зависит от коэффициента подъемной силы и угла атаки, а второй является

центром давления, которое представляет собой положение по хорде, относительно которого момент тангажа равен нулю.

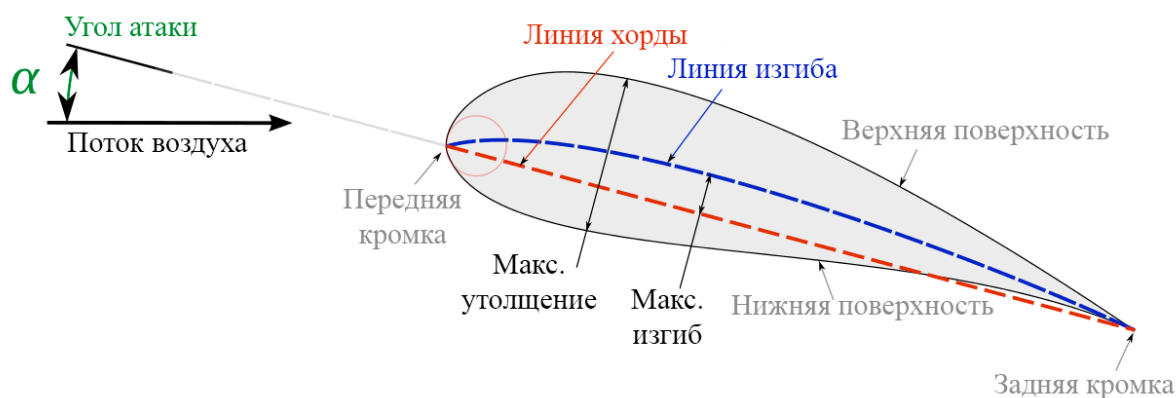


Рисунок 4 – Основные характеристики аэродинамического профиля

Благодаря третьему закону Ньютона мы знаем, что если аэродинамический профиль оказывает на воздух направленную вниз силу, то воздух, в свою очередь, будет воздействовать на крыло восходящей силой. Подъемная сила аэродинамического профиля в первую очередь является результатом его угла атаки и формы [31].

Крылья имеют такую форму, что воздух проходит быстрее над верхней частью крыла и медленнее под ним. Согласно закону Бернулли, быстро движущийся воздух соответствует низкому давлению воздуха, а медленно движущийся воздух соответствует высокому давлению воздуха. Таким образом, высокое давление воздуха под крыльями будет толкать самолет вверх из-за более низкого давления воздуха. В аэродинамике угол атаки определяет угол между линией хорды крыла и относительным потоком воздуха. Поскольку крыло может иметь кручение, хордовая линия всего крыла не может быть определена, поэтому просто определяется альтернативная опорная линия. Часто в качестве базовой линии выбирают хорду корня крыла. При ориентации под подходящим углом аэродинамический профиль отклоняет встречный воздух, в результате чего на аэродинамический профиль действует сила в направлении, противоположном отклонению. Эта сила

известна как аэродинамическая сила и может быть разделена на две составляющие: подъемную силу и сопротивление.

Большинству форм аэродинамического профиля требуется положительный угол атаки для создания подъемной силы, но изогнутые аэродинамические поверхности могут создавать подъемную силу при нулевом угле атаки. Это «поворот» воздуха вблизи аэродинамического профиля создает изогнутые линии тока, что приводит к более низкому давлению с одной стороны и более высокому давлению с другой. Эта разница давлений приводит к тому, что поле потока вокруг аэродинамического профиля имеет более высокую среднюю скорость на верхней поверхности, чем на нижней поверхности. Работа воздушных потоков представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Наглядная работа воздушных потоков

Симметричное крыло имеет нулевую подъемную силу при угле атаки  $0^\circ$ . Увеличение угла атаки связано с увеличением подъемной силы, создаваемой аэродинамическим профилем, и коэффициента подъемной силы до максимального предела. По мере увеличения угла атаки отрыв воздушного потока от верхней поверхности крыла становится более выраженным, а точка отрыва потока смещается от задней кромки к передней кромке, что приводит



к уменьшению скорости нарастания подъемной силы коэффициент. Наименьшее давление на фольгу наблюдается в точке горба вблизи передней кромки [31].

Перед этой точкой низкого давления, также известной как точка перехода, существует ламинарный поток, а за ним начинается турбулентный поток. Поскольку точка перехода является областью наименьшего давления аэродинамического профиля, существует неблагоприятный градиент давления, а давление воздуха здесь ниже, чем на задней кромке.

Таким образом, неблагоприятный градиент давления действует против регулярного потока воздуха над аэродинамическим профилем. Нормальное сопротивление поверхностного трения, действующее на аэродинамический профиль, уменьшает кинетическую энергию потока. Итак, нет энергии действовать против неблагоприятного. Таким образом, нижние уровни пограничного слоя перестают двигаться, а верхние слои обгоняют их. Это вызывает разрыв потока.

Критический угол атаки – это угол атаки, обеспечивающий максимальный коэффициент подъемной силы. Это также называется «углом атаки сваливания». Ниже этого критического угла атаки и по мере увеличения угла атаки коэффициент подъемной силы  $C_L$  увеличивается. Наоборот, выше критического угла атаки воздух начинает менее плавно обтекать верхнюю поверхность профиля и начинает разделяться [32].

При критическом угле атаки верхний поверхностный поток более разделен, и аэродинамический профиль или крыло создают максимальный коэффициент подъемной силы. По мере дальнейшего увеличения угла атаки верхний поверхностный поток все более и более отрывается, при этом крыло создает еще меньшую подъемную силу,  $C_L$  уменьшается, а коэффициент лобового сопротивления  $C_D$  быстро увеличивается [33].

Критический угол атаки или угол сваливания обычно составляет около 12–20 ° для многих аэродинамических профилей, пример таких углов представлен на рисунке 6.

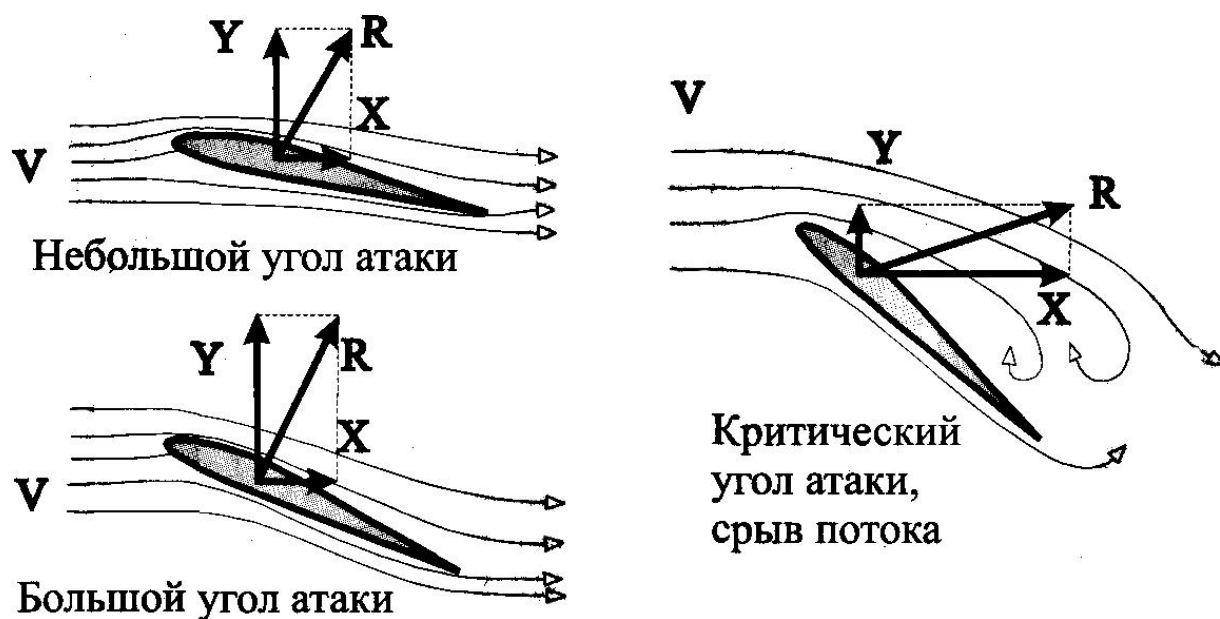


Рисунок 6 – Поведение воздушного потока вокруг аэродинамического профиля при разных углах атаки

Несмотря на большое сопротивление профиля в режимах после сваливания, мягкий срыв может расширить диапазон доступных характеристик при  $C_{Lmax}$ . Итак, одно из требований состоит в том, что крыло с высокой прижимной силой, должно обладать мягким сваливанием и поддерживать  $C_{Lmax}$  или работать близко к нему для большого диапазона углов атаки, чтобы обеспечить гибкость при настройке автомобиля [34].

Из-за очень низкого удлинения крыльев гоночных автомобилей основным источником сопротивления является индуцированная составляющая общего сопротивления. Таким образом, главная задача конструкции аэродинамического профиля для автоспорта заключается не в уменьшении сопротивления профиля. Вместо этого это максимизация прижимной силы и способность спроектированного аэродинамического профиля поддерживать максимально возможные уровни прижимной силы в широком диапазоне физических и аэродинамических неблагоприятных условий.

## **2 Существующие конструкции и типы аэродинамического обвеса для болида класса «Формула»**

Аэродинамические элементы являются одной из ключевых областей в разработке автомобилей класса «Формула», они могут легко изменить ситуацию в соревнованиях, напрямую влияя на максимальную скорость и скорость прохождения поворотов. В зависимости от требуемых целей каждой рассматриваемой команды они могут либо уменьшить лобовое сопротивление и увеличить максимальную скорость, либо увеличить прижимную силу и уровни лобового сопротивления для скоростей прохождения поворотов, либо стремиться к балансу между ними [35]. Аэродинамические элементы бывают разных форм и в основном возникли с первых дней соревнований «Формула студент» с обтекаемым дизайном.

Это было попыткой увеличить общую максимальную скорость и оказало большое влияние на направления дизайна. Наиболее распространенные и многие другие устройства используются для повышения аэродинамической эффективности автомобилей класса «Формула», что, в свою очередь, помогает удерживать шины на дорожном покрытии и максимизировать сцепление с дорогой. Существует много различий между аэродинамическими конструкциями «открытое колесо» и «закрытое колесо», и некоторые компоненты не применимы в обеих спецификациях, но у них общая цель — увеличить уровень прижимной силы с минимальным сопротивлением. Создание прижимной силы без создания сопротивления невозможно, и всегда необходимо соблюдать определённый баланс.

### **2.1 Носовой обтекатель**

Носовой обтекатель — это область аэродинамической переборки перед ногами водителя. Как видно на гоночных автомобилях с открытыми колесами, это эффективный способ установить переднее крыло и минимизировать

лобовую площадь. Его конструкция способствует оптимизации воздушного потока поддона и диффузора, что способствует уменьшению сопротивления и увеличению потенциала прижимной силы.

Высота и поперечное сечение в этой области имеют решающее значение, так как требуется минимальное поперечное сечение между передними колёсами и как можно больше места под кузовом, чтобы направить поток воздуха вокруг и под боковыми понтонами. Таким образом, большинство команд склонны поднимать носовые обтекатели настолько высоко, насколько это возможно. Новые конструкции носового обтекателя, как правило, имеют наклонную верхнюю поверхность и V-образное поперечное сечение по отношению к передней переборке, чтобы сделать поверхности более аэродинамически эффективными.

Передняя часть кузова автомобиля класса «Формула» обычно испытывает наибольшее давление на весь автомобиль. Это связано с тем, что быстро движущийся воздух застаивается (замедляется), когда попадает в носовой обтекатель, вызывая повышение давления [30]. Это стагнационное давление может быть полезным, если целью носового обтекателя является прижимная сила, или нежелательным, если целью является минимизация сопротивления. Для носа с прижимной силой верхняя поверхность будет иметь небольшую кривизну, чтобы максимизировать давление застоя. Угол между верхней поверхностью носа и землей определяет, какая прижимная сила и сопротивление будут создаваться. Носовой конус с низким сопротивлением будет иметь выпуклую кривизну, которая снижает сопротивление, но также создает некоторую подъемную силу [29]. Носовой конус с низким сопротивлением представленный на рисунке 7, вероятно, является лучшим вариантом, поскольку носовая часть с прижимной силой создает как прижимную силу, так и сопротивление.

Подъемной силе, создаваемой носовым обтекателем с низким сопротивлением, можно противодействовать за счет использования переднего крыла, которое также может создавать прижимную силу на нос. Помимо

добавления дополнительной прижимной силы, передние аэродинамические устройства помогают сбалансировать автомобиль аэродинамически, обеспечивая перемещение центра давления. Передний центр давления создает избыточную поворачиваемость, а задний центр давления создает недостаточную поворачиваемость, в то время как он также перемещается назад с увеличением скорости.

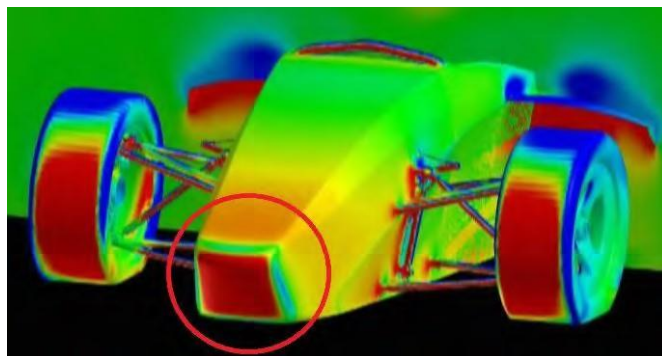


Рисунок 7 – Точка застоя на носовом обтекателе автомобиля FSAE, носовой обтекатель этого типа создает большое сопротивление

Эффективность зоны низкого давления под автомобилем серьезно снижается из-за низкого расположения передней части автомобиля. Низкие носовые обтекатели эффективно отводят воздух в стороны и вверх вокруг верхней части кузова автомобиля и значительно уменьшают объем воздуха, проходящего под автомобилем. Однако создание низкого давления зависит от увеличения скорости воздуха, проходящего под автомобилем, по сравнению с воздухом, проходящим над ним и вокруг него.

Высокий нос показанный на рисунке 8, позволяет воздуху проходить прямо под носом, а не обходить его. На первый взгляд, более высокий нос равен меньшей прижимной силе, поскольку сам по себе он выталкивает меньше воздуха вверх над носом. Однако это не только может уменьшить лобовое сопротивление, но и весь воздух, прошедший под носом, направляется под автомобиль или разделяется на обе стороны автомобиля с помощью сплиттеров, расположенных перед боковыми понтонами.

Проще говоря, чем больше воздуха может быть втянуто под автомобиль, тем быстрее должен будет двигаться воздух, а чем быстрее движется воздух, тем ниже давление [27]. Хотя подъем носовой части автомобиля увеличивает объем воздуха, проходящего под автомобилем, эффективность переднего крыла снижается по мере того, как оно поднимается от земли из-за эффекта земли. Это означает, что при проектировании должен быть найден компромисс между расстоянием носовой части от земли и высотой дорожного просвета переднего крыла, чтобы функциональность первого не влияла на аэродинамическую эффективность другого [28].



Рисунок 8 – Один из лучших аэродинамических элементов – носовой обтекатель, болид Tankia 2010 – TU Graz

Далее перейдем к рассмотрению переднего крыла.

## 2.2 Переднее крыло

Первой частью автомобиля FSAE, которая соприкасается с воздухом, безусловно, является переднее крыло. Это означает, что это первая часть автомобиля, которая взаимодействует с воздухом, поэтому она играет важную роль в определении потока под потоком через остальную часть автомобиля.

Передние крылья обычно устанавливаются близко к подвеске или на опорах, чтобы максимально эффективно передавать нагрузку вниз и создавать прижимную силу, чтобы прижимать шины передних колес к земле и обеспечивать более высокий уровень сцепления [29].

Переднее крыло создает до 20-30% всей прижимной силы автомобиля. Базовая конструкция переднего крыла FSAE, как правило, представляет собой многоэлементный аэродинамический профиль, который обычно представляет собой тесно связанные аэродинамические поверхности, состоящие из двух или даже четырех элементов, выступающих с обеих сторон носовой части, с подвижными закрылками, встроенными в конструкцию для регулировки угла атаки. Основным элементом крыла обычно является симметричный аэродинамический профиль, который приподнят в центре, чтобы обеспечить немного лучший поток воздуха к днищу, но это также снижает чувствительность крыла к дорожному просвету [10].

Передние крылья оказывают минимальное влияние на сопротивление для всей аэродинамической конструкции, в отличие от небольших изменений в задней части автомобиля, которые могут привести к снижению сопротивления из-за изменения следа. Конструкция переднего крыла имеет решающее значение для управления потоком воздуха над задней частью автомобиля и обеспечения потока воздуха к аэродинамическим элементам под полом. Очень распространенная ошибка, которую совершают многие команды, заключается в том, что они размещают три или четыре элемента в области между внутренней стороной передних колес и носовым обтекателем, чтобы добиться как можно большей прижимной силы.

Этот тип конструкции предотвращает попадание большого количества воздуха прямо в боковые отсеки, поэтому радиаторы получают меньший поток воздуха, и температура двигателя автомобиля может резко возрасти. Любые аэродинамические проблемы в передней части автомобиля оказывают огромное влияние на заднюю часть автомобиля, поэтому очень важно решить эту проблему с самого начала процесса проектирования.

Части переднего крыла, конструкция которых обычно меняется больше всего, представляют собой концевые пластины пример на рисунке 9, которые устанавливаются на обоих концах крыла, и их роль заключается в том, чтобы помочь воздушному потоку направиться над крылом или под ним, что еще больше повышает его эффективность. Основная функция этой функции состоит в том, чтобы не дать воздуху под высоким давлением в верхней части крыла перекачаться через конец крыла в воздух с низким давлением под ним, вызывая индуктивное сопротивление [11]. Чтобы повысить эффективность переднего крыла и максимизировать производительность, торцевые пластины предотвращают попадание воздуха на компонент и контролируют воздушный поток, помогая гарантировать, что воздушный поток направляется на заднее крыло и не выходит за его стороны, при этом уменьшая сопротивление [12].

Обратный поток воздуха от устройства сглаживается и способствует повышению эффективности других аэродинамических устройств. Кроме того, еще одна конструктивная цель концевых пластин - препятствовать попаданию грязного воздуха, создаваемого передними шинами, под пол автомобиля. В дополнение к этому, некоторые команды используют «сплиттеры», которые представляют собой вертикальные ограждения, прикрепленные к нижней поверхности переднего крыла, чтобы помочь концевой пластине [25]. Это также может помочь справиться с турбулентностью, создаваемой передними колесами.

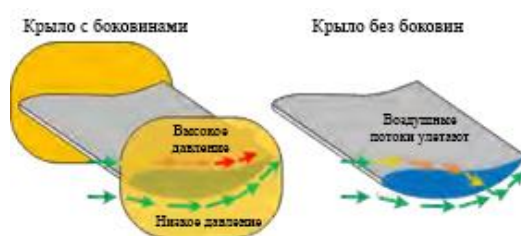


Рисунок 9 – Как концевые пластины (боковины) повышают эффективность крыла

Открытые колеса автомобиля класса «Формула», вероятно, вызывают наибольшее сопротивление, чем любая другая часть автомобиля. Поскольку



правила FSAE запрещают какое-либо покрытие колес, за ними неизбежно происходит большой отрыв потока, что вызывает большие величины формируемого сопротивления [26].

Величина создаваемого трения кожи о кузов не может даже сравниться с этим типом сопротивления. Взаимодействие между передними колесами и передним антикрылом очень затрудняет поиск наилучшего решения, однако большинство команд используют переднее антикрыло для отражения встречного воздуха вокруг передних колес [23]. Основная конструктивная модификация коснулась концевых пластин и закрылков крыла с целью уменьшить вихревой поток и след от переднего колеса, либо за счет изогнутых внутренних краев концевых пластин переднего крыла, чтобы направить воздух к шасси и колесам, либо с внешней стороны. края к концевым пластинам, чтобы направлять воздух снаружи передних колес [24].

На нижних наружных кромках концевых пластин переднего крыла обычно имеется несколько полукруглых тоннелей, называемых подножками. Эти туннели предназначены для предотвращения миграции воздушного потока снаружи торцевой пластины снизу в область низкого давления, развиваемую крылом. Когда воздушный поток с более высоким давлением движется вокруг и проходит под концевой пластиной, он спотыкается о край концевой пластины и течет в зону низкого давления под крылом, и это поперечное смешивание воздушных потоков высокого и низкого давления вызывает образование небольшого, но мощного вихря внутри концевой пластины, поэтому опорные пластины также называют вихревыми туннелями.

Когда вихрь отделяется от твердой поверхности, он обладает ядром низкого давления, в некотором роде уравнивающим центробежную «силу» воздуха, вращающегося вокруг вихря по винтовым траекториям. Эти вихри действуют как воздушные «завесы», изолируя другие области низкого давления, такие как днище, а также могут обеспечивать большие углы атаки для использования элементов переднего крыла, даже прямо перед передними колесами и без остановки воздушного потока. с их поверхности. Затем этот

поток будет перемещаться на заднюю часть шины, и, если подножка спроектирована правильно, это поможет контролировать след передней шины от передних колес [21].

Если переднее крыло создает турбулентный след или плохо генерирует вихри, то каждое устройство, разработанное после переднего крыла, должно быть оптимизировано для работы в этой среде, но часто с меньшим успехом. Многочисленные тесты с разным дорожным просветом и углами атаки крыла показали, что эти тоннели позволяют значительно улучшить прижимную силу переднего крыла до 8%. Однако из-за того, что подножки считаются частью переднего крыла, они должны располагаться в пределах максимально допустимого для крыльев размера, определенного правилами FSAE, и не могут выступать за передние колеса [22]. Это означает, что длина крыла должна быть уменьшена на соответствующую величину, чтобы ступенька соответствовала правилам.

Испытания с использованием крыльев разной длины показали, что потеря до 15% общей прижимной силы переднего крыла может быть результатом необходимого уменьшения длины крыла, и это основная причина, по которой большинство команд избегают использования ступенек в своих крыльях.

Связь между передним крылом и землей очень деликатная: крыло, как правило, более эффективно, чем ближе оно подходит к гусенице, из-за возникающего граунд-эффекта. Передние крылья болидов класса «Формула» обычно работают наиболее эффективно с граунд-эффектом, как правило, при высоте дорожного просвета около 40–80 мм, в зависимости от конструкции крыла. Следовательно, переднее крыло должно быть размещено в низком положении рядом с землей, чтобы получить как можно больше преимуществ от использования граунд-эффекта. Чем выше высота дорожного просвета, тем больше колеса уменьшают прижимную силу крыла и увеличивают сопротивление крыла, в то время как сопротивление колес сами тоже поднимаются.

Однако при малой высоте дорожного просвета происходит обратное, и характеристики крыла улучшаются, а колеса создают меньшее сопротивление. Задняя часть аэродинамического профиля действует как диффузор, а область более низкого давления за аэродинамическим профилем способствует увеличению скорости воздушного потока между аэродинамическим профилем и землей [22]. Оба эти фактора способствуют снижению давления под аэродинамическим профилем, и это является причиной того, что перевернутое крыло в условиях экранного эффекта имеет лучшие характеристики по сравнению с аэродинамическим профилем в набегающем потоке.

По мере увеличения угла атаки подъемная сила также увеличивается, пока сваливание не достигается под гораздо меньшим углом по сравнению с аэродинамическим профилем набегающего потока.

### **2.3 Заднее крыло**

Заднее антикрыло, как представлено на рисунке 10, является важным компонентом для работы автомобиля FSAE. Это устройство создает примерно одну треть общей прижимной силы автомобиля, а его вес обычно составляет около 3-4 кг. Основная функция заднего антикрыла состоит в том, чтобы помочь в первую очередь в торможении и прохождении поворотов для задних шин, чтобы исключить избыточную поворачиваемость [19].

Заднее крыло представляет собой многоэлементный аэродинамический профиль, состоящий обычно из трех или четырех наборов элементов, соединенных друг с другом концевыми пластинами крыла. Несколько крыльев и закрылков используются для увеличения прижимной силы в заднем крыле. Два крыла производят больше прижимной силы, чем одно крыло, но не в два раза больше. Коэффициент подъемной силы увеличивается, а отношение подъемной силы к лобовому сопротивлению уменьшается при увеличении количества аэродинамических профилей.

Многоэлементные аэродинамические поверхности увеличивают прижимную силу, обеспечивая больший общий изгиб крыла с большим углом атаки и задерживая отрыв потока вблизи задней кромки. Эта задержка отрыва потока на отклоненном элементе закрылка достигается введением щели перед носовой частью закрылка для контроля пограничного слоя. Нижний и самый большой аэродинамический профиль обеспечивает наибольшую прижимную силу, в то время как 2-3 верхних и меньших аэродинамических профиля обеспечивают меньшую прижимную силу, но могут повысить эффективность нижнего профиля, поскольку они предотвращают остановку воздушного потока [20]. Иногда над выходом диффузора размещают еще более низкий дополнительный аэродинамический профиль, создавая область низкого давления прямо под крылом, чтобы помочь диффузору создать большую прижимную силу под автомобилем.



Рисунок 10 – Заднее крыло болида Black Scorpion G2, команды TRT

Однако на воздушный поток в задней части автомобиля может влиять множество различных факторов (впуск, кузов, водитель и т. д.) от остальной части автомобиля в передней части, поэтому его называют «грязным»,

поскольку он в основном представляет собой отдельный воздух, который течёт с большим количеством турбулентностей [18]. Это приводит к тому, что заднее крыло менее аэродинамически эффективно, чем переднее крыло, из-за расходуемого воздушного потока, с которым ему приходится сталкиваться.

Существует множество параметров, включая ширину зазора между элементами, ориентацию каждого последующего элемента и крутящий момент по размаху, которые должны быть правильно рассчитаны для достижения максимальной эффективности в зависимости от потока, достигающего заднего крыла. Положение крыльев относительно друг друга также имеет значение. Если они слишком близко друг к другу, результирующие силы будут в противоположных направлениях и, таким образом, компенсируют друг друга, пример представлен на рисунке 11.

Заднее крыло обычно создает почти в два раза большую прижимную силу, чем переднее крыло, чтобы поддерживать баланс управляемости автомобиля, но это также зависит от конструкции и настройки подвески каждого автомобиля класса «Формула». Можно увидеть большее удлинение или угол атаки по сравнению с передним крылом, и часто две или более секций, уложенных друг на друга, используются друг над другом, чтобы создать необходимую прижимную силу и максимально увеличить доступное пространство. В автомобилях с задними колесами это очень важно, и заднее антикрыло не только добавит ускорение и тормозные способности, но и сцепление на поворотах. Большой угол крыла увеличивает прижимную силу и создает большее сопротивление, тем самым снижая максимальную скорость автомобиля. Таким образом, при гонках на трассах FSAE с длинными прямыми и небольшим количеством поворотов лучше проектировать крылья так, чтобы они имели небольшой угол атаки. Наоборот, когда автомобиль мчится по трассам FSAE с большим количеством поворотов и небольшим количеством прямых, требуется большая прижимная сила, поэтому лучше проектировать крылья так, чтобы они имели больший угол атаки.

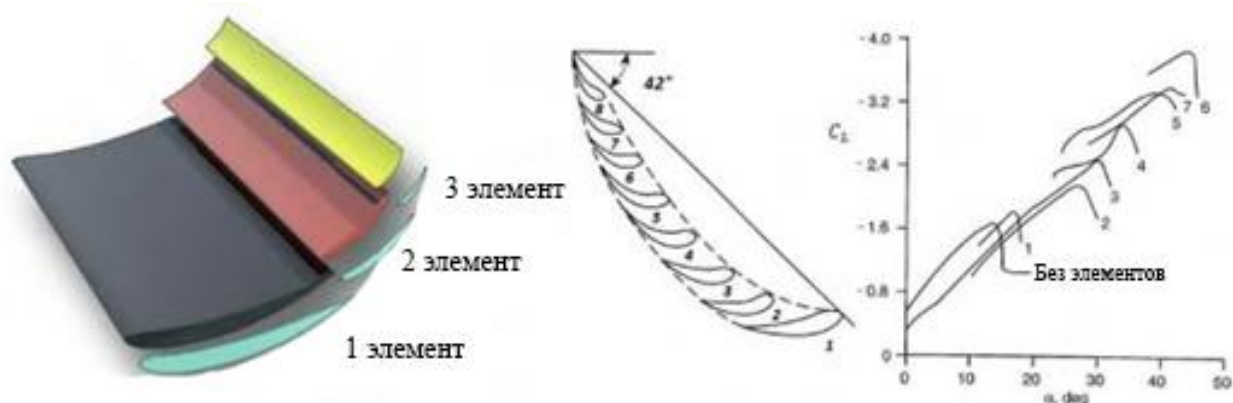


Рисунок 11 – Изменение коэффициента подъемной силы в зависимости от количества элементов

Когда воздух обтекает крыло, его форма искажается, вызывая силу сопротивления. Хотя эта сила рассчитана на меньшую, чем прижимная сила, она может серьезно ограничить максимальную скорость и заставить двигатель использовать больше топлива для движения автомобиля по воздуху [15].

Конструкция крыльев должна отражать необходимость создания достаточного сцепления для торможения на скорости без заноса. Это позволяет использовать более мощные тормоза с теми же шинами, поскольку прижимная сила увеличивает сцепление шин с дорогой. Также необходимо учитывать максимальную скорость автомобиля и необходимую скорость замедления. Крылья должны быть оптимизированы между прижимной силой, необходимой для сцепления при торможении, и сопротивлением, которое они производят. Основная проблема при проектировании заднего антикрыла – турбулентность или «след», который остается за этим устройством [15].

Чтобы убедиться, что след сведен к минимуму, воздух, выходящий из автомобиля, не должен быть турбулентным с вихрями. Однако из-за эффекта трубы Вентури под автомобилем и крыла, создающего прижимную силу над автомобилем, два выходящих «грязных» воздушных потока встречаются в задней части автомобиля, создавая большие вихри и значительно влияя на аэродинамику автомобиля, создавая сопротивление. Поэтому всегда ставится

цель сделать так, чтобы два воздушных потока встретились как можно более линейно с минимальным сопротивлением.

Торцевые пластины заднего крыла спроектированы с учетом формы и функциональности [14]. Благодаря своей форме они обеспечивают удобный и прочный способ крепления крыльев. Аэродинамическая функция этих торцевых пластин состоит в том, чтобы предотвратить утечку воздуха вокруг окантовок крыла и, таким образом, они задерживают развитие сильно сконцентрированных вихрей. Вихревой хвост или индуктивное сопротивление является доминирующим сопротивлением для любого типа крыльев. Дополнительная функция задних торцевых пластин состоит в том, чтобы помочь уменьшить влияние восходящего потока от колес.

Вихри начинаются позже на крыле с концевыми пластинами, потому что воздушный поток вынужден двигаться в одном направлении движения и может начать закручиваться только за задним крылом. Разделение аэродинамического профиля на отдельные элементы является одним из способов преодоления отрыва потока, вызванного неблагоприятными градиентами давления.

На больших углах атаки воздух не может следовать контуру нижней поверхности крыла и может отрываться (сваливаться), снижая эффективность крыла и увеличивая сопротивление. Добавление небольшой кромки на задней кромке вызывает более низкое давление сразу за ней, что всасывает нижний поток обратно к поверхности крыла. Закрылок Герни (или плетеный клюв) представляет собой небольшой выступ, выступающий из задней кромки крыла. Обычно он устанавливается под более высокими углами атаки на поверхности аэродинамического профиля со стороны высокого давления, и его высота должна быть порядка толщины местного пограничного слоя или 1–4% длины хорды крыла, чтобы быть эффективным. Это устройство задней кромки может улучшить характеристики простого аэродинамического профиля почти до того же уровня, что и сложная конструкция с высокими характеристиками.

Устройство в основном работает за счет увеличения давления на стороне высокого давления крыла, уменьшения давления на стороне всасывания и помогает потоку пограничного слоя оставаться прикрепленным на всем пути к задней кромке на стороне всасывания аэродинамического профиля. В то же время длинный след за закрылком, содержащий пару встречно вращающихся вихрей, может задержать или исключить отрыв потока вблизи задней кромки на нижней поверхности. Соответственно увеличивается общий отсос на аэродинамическом профиле. Конструктор должен получить максимально возможную прижимную силу от поверхностей крыла, разрешенных правилами [13].

Закрылки Герни, безусловно, вызывают некоторое дополнительное сопротивление, но могут генерировать большую прижимную силу от допустимых крыльев из-за более высоких углов атаки. Закрылки Герни также используются как быстрый способ точной настройки силы, создаваемой крылом, чтобы отрегулировать поведение автомобиля. Изменение высоты закрылка «Герни» регулирует прижимную силу (и сопротивление, конечно), поэтому большинство команд разработали способы быстрой замены «Герни».

Как правило, когда цель максимальной скорости является основным соображением конструкции, уменьшение угла атаки неизбежно, чтобы минимизировать сопротивление [16]. Обычно элементы заднего крыла спроектированы так, чтобы иметь возможность регулировки, как и передние крылья, каждый из них можно регулировать, когда автомобиль участвует в различных динамических этапах (ускорение, выносливость и т.д.), С помощью маленьких ключей с внутренним шестигранником для достижения требуемых уровней прижимной силы и сопротивления для каждого этапа. Например, в событии «Ускорение» многие команды часто предпочитают устанавливать свои задние крылья под малым или даже нулевым углом атаки, чтобы свести к минимуму сопротивление элементов, в то время как до тех пор, пока автомобиль не достигнет скорости не менее 40 км/ч, заднее крыло не создавать достаточную прижимную силу, чтобы обеспечить необходимое сцепление с



шинами, чтобы избежать пробуксовки. С другой стороны, в соревнованиях на выносливость и скидпад, где прижимная сила имеет жизненно важное значение для текущих поворотов, команды устанавливают свои задние крылья под углом атаки, который они разработали, чтобы они работали и были наиболее эффективными [10].

Некоторые из наиболее продвинутых команд «Формулы студент» также используют систему снижения лобового сопротивления (DRS), работающую с электронными приводами, которые дают водителю возможность одним нажатием кнопки выровнять угол атаки элементов заднего крыла во время движения, чтобы уменьшить лобовое сопротивление и прижимную силу, тем самым увеличивая максимальную скорость [12].

В ближайшем будущем активные аэродинамические устройства будут настроены с помощью компьютерных расчетов, чтобы они работали определенным образом в зависимости от скорости, оборотов в минуту, радиуса поворота и состояния трассы, что даст огромный прирост производительности по сравнению с большинством статических настроек, требующих корректировки, которые существуют сегодня. Это поможет достичь максимальных уровней производительности шин, одновременно повысив экономию топлива и общую эффективность вождения автомобиля.

## **2.4 Диффузор**

Днище автомобиля — не только самый большой аэродинамический компонент автомобиля FSAE, но и самый аэродинамически эффективный, производящий почти в 9 раз больше прижимной силы на единицу сопротивления, чем заднее антикрыло. Поскольку в 2015 году изменились основные правила, которые сильно ограничивают размер заднего крыла, основное внимание уделяется оптимизации днища, что сделало его важной частью обвеса.

Расположение поддона очень важно, потому что нахождение в такой непосредственной близости от земли означает, что он может использовать гранд-эффект, который существенно увеличивает силу всасывания, создаваемую воздушным потоком под поверхностью поддона. Сближение этих поверхностей ускоряет поток, что приводит к снижению давления и увеличению прижимной силы поддона. Простая гидродинамика говорит, что, когда поток ускоряется, его давление уменьшается. Фактически это эффект сопла (или эффект Вентури), когда поток в сужающемся сопле ускоряется и падает давление, а затем восстанавливается в диффузоре. При формировании нижней части кузова в виде перевернутого крыла, соответствующих туннелей или даже простого угла наклона, работающего с эффектом Вентури, общее давление между днищем и землей уменьшается, создавая дополнительную прижимную силу [20].

Ключевая роль днища заключается в ускорении потока воздуха под автомобилем, создавая большую разницу в давлении между верхней и нижней поверхностями автомобиля, тем самым увеличивая прижимную силу и аэродинамическое сцепление, которое буквально засасывает автомобиль на трассу, создавая большую более высокий уровень сцепления.

Диффузор — это задний элемент в днище автомобиля класса «Формула», расположен он близко к полу. Из него воздух выходит из автомобиля. Это последние компоненты, где воздух взаимодействует с автомобилем. Задача диффузора состоит в том, чтобы снова замедлить обратный поток и предоставить отработанному воздушному потоку из днища автомобиля как можно больше места для выхода из задней части. В конечном итоге это означает, что если воздух может легче выходить из-под автомобиля, то больше воздуха с более высокими скоростями может проходить под днищем автомобиля, создавая более низкое давление и, следовательно, более высокую прижимную силу.

Диффузор увеличивается в объеме по длине, создавая пустоту, которую приходится заполнять воздухом, проходящему под корпусом. Этот эффект

Вентури означает, что поток ускоряется через горловину диффузора, создавая желаемое низкое давление, а затем постепенно возвращается к той же скорости, с которой он присоединился к следу. Важно повторно выровнять большую разницу давлений, которую создает поддон между ним и давлением окружающей среды, окружающей автомобиль [6]. Без системы диффузии для постепенного замедления воздуха значительное сопротивление будет вызвано вынужденным, внезапным смешением потоков воздуха высокого и низкого давления. Кроме того, расширяющийся воздух, выходящий из нашего диффузора, может взаимодействовать с задним крылом, улучшая их совместные характеристики, пример показан на рисунке 12.

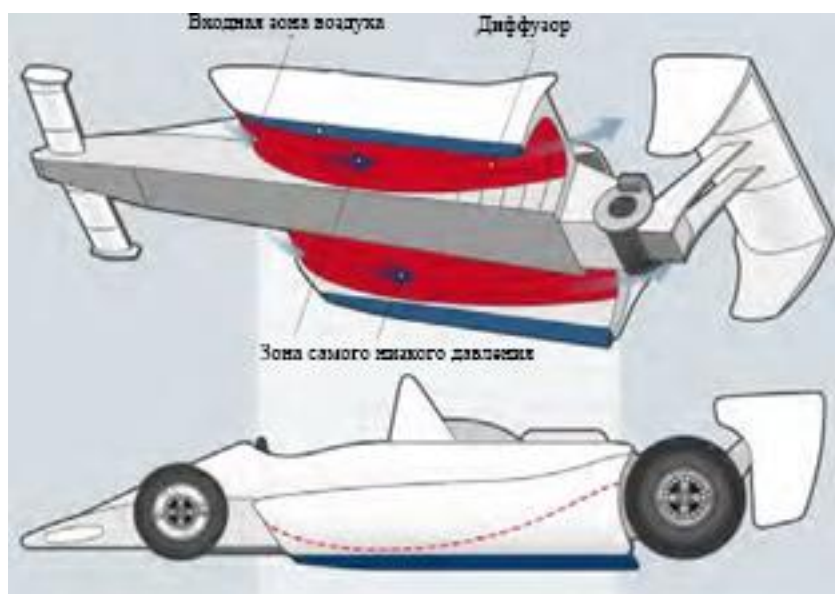


Рисунок 12 – Диффузор работает как перевернутый аэродинамический профиль

При работающем диффузоре автомобиль превращается в трубу Вентури, что является наиболее эффективным аэродинамическим обвесом на автомобилях класса «Формула», пример представлен на рисунке 13. Однако, учитывая, что диффузор потенциально может дать величину в размере 30-40% от общей прижимной силы, выход использованного воздушного потока иногда можно считать гораздо более значительным. Диффузоры используют область низкого давления позади автомобиля и иногда могут использовать

выхлопные газы, выбрасываемые на высокой скорости в диффузор, для создания еще более низкого давления (выдувные диффузоры). Скорость воздушного потока может значительно влиять на прижимную силу, при этом чем быстрее выходит поток, тем больше создается прижимная сила. С увеличением скорости движения будет увеличиваться и скорость движения.

Когда это произойдет, пропорциональная разница между скоростью воздуха над поддоном и под поддоном увеличится. Это означает, что разница в давлении будет выше. Таким образом, генерируемая прижимная сила и сопротивление полностью зависят от размеров диффузора днища и скорости воздуха/скорости автомобиля. Когда выбраны неправильные размеры, диффузор поддона будет создавать большое сопротивление и создавать небольшую прижимную силу или даже положительную подъемную силу [7].

Диффузор создает прижимную силу не только на заднюю часть автомобиля, но, по сути, он создает прижимную силу по всему автомобилю.

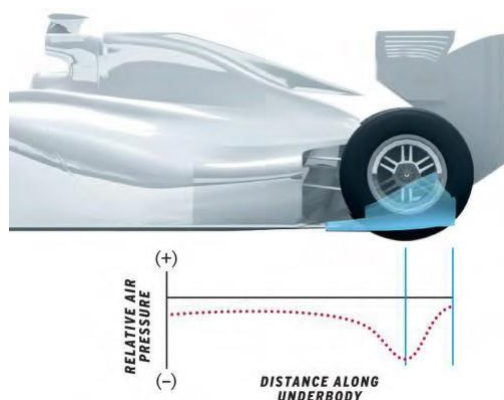


Рисунок 13 – Самое низкое давление возникает там, где воздух перемещается с самой большой скоростью, сразу перед диффузором

Угол или наклон диффузора также важен, диффузор должен иметь плавное изменение угла, чтобы предотвратить отрыв потока от его крыши и боковых сторон. Угол диффузора относительно земли влияет на величину создаваемой прижимной силы. Если угол диффузора близок к нулю, то отрыва потока пограничного слоя не произойдет, но скорость воздуха не уменьшится

настолько, чтобы совершить ламинарный переход воздуха в конце кабины при встрече двух воздушных потоков. Если диффузор имеет очень большой угол, поток пограничного слоя будет отрываться, и поток воздуха под диффузором будет турбулентным [8].

Как правило, желательно иметь наибольший угол без отрыва потока для создания максимальной прижимной силы. Как только происходит отрыв, прижимная сила уменьшается, а сопротивление значительно увеличивается. Двумерное моделирование угла диффузора показывает, что максимальная прижимная сила достигается при угле 8-12°. Однако на самом деле происходит другой эффект, который меняет это утверждение. Начиная с входа в диффузор, образуется вихрь, который движется по всей длине диффузора. Вихрь добавляет вращательную составляющую к скорости, уменьшая давление по его длине.

Этот вихревой поток также добавляет энергии потоку и задерживает разделение, позволяя увеличить угол диффузора. Вихри также можно использовать на других частях поддона. Большие генераторы вихрей могут быть размещены на входе в поддон, чтобы вихри перемещались по всей длине автомобиля, снижая давление и увеличивая прижимную силу. Эти вихри также можно использовать по бокам поддона, создавая «ложное уплотнение», которое также увеличивает прижимную силу.

## **2.5 Боковые понтоны**

Боковой понтон — это часть рядом с кабиной, в которой находится радиатор, а часто и система выхлопа двигателя и масляного бака. Основная функция боковых понтонов — обеспечить достаточное количество воздуха для охлаждения двигателя и контролировать поток воздуха под днищем для создания желаемой прижимной силы, пример представлен на рисунке 14.

Профиль боковых понтонов значительно различается на каждом автомобиле в зависимости от различных аэродинамических конструкций.

Внутреннее формирование должно максимизировать скорость теплопередачи и уменьшить потери на сопротивление, что само по себе может быть балансирующим действием [8]. В конструкцию обычно входят дымоходы, а охлаждающие жалюзи помогают максимально быстро отводить горячий воздух. Общий дизайн боковых понтонов вначале был довольно высоким и квадратным, но современные конструкции стали ниже и изящнее, поскольку команды стремятся к меньшему сопротивлению и большей прижимной силе в задней части автомобиля.



Рисунок 14 – Боковые понтоны команды из университета Окленда

Ширина и высота боковых понтонов определяются необходимостью размещения масляного и водяного радиаторов охлаждения двигателя и выхлопных газов. Распределение тепла двигателя на воду и масло будет зависеть от философии конструкции двигателя, но в целом оно будет одинаковым для всех двигателей. Большинство команд стремятся свести к минимуму количество отводимого двигателем тепла и максимально увеличить температуру охлаждающей жидкости, чтобы свести к минимуму размеры радиаторов и требования к воздушному потоку для системы охлаждения. Однако из соображений безопасности выбираются радиаторы большего

размера, чем необходимо, поэтому все пространство, доступное в боковых отсеках, занимает все пространство, доступное в боковых отсеках, для упаковки радиаторов и их воздухопроводов для их охлаждения. Чем больше радиатор, тем больше его сопротивление воздушному потоку и, следовательно, увеличивается сопротивление.

Происходит параболический рост гидравлического сопротивления от увеличения числа Рейнольдса [8]. В этом случае увеличение числа Рейнольдса означает увеличение скорости. Таким образом, цель состоит в том, чтобы добиться максимального отвода тепла при минимально возможном сопротивлении. На скорость теплопередачи также влияет площадь входа в боковую часть, поскольку она определяет, будет ли поток в боковую часть ламинарным или турбулентным. Изменение площадей как на выходе, так и на входе системы охлаждения для обеспечения только необходимого объема охлаждения в любых заданных условиях означает, что лобовое сопротивление при охлаждении и расход топлива сведены к минимуму.

Распределение скорости на передней грани излучателя должно быть равномерным. По этой причине впускное отверстие боковой части спроектировано таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение скорости на передней поверхности радиатора и в то же время сбалансировать распределение давления на входе и выходе, чтобы минимизировать сопротивление от достаточного потока воздуха через радиатор. Лучший способ спроектировать воздухопровод, чтобы избежать разделения, которое снизит эффективность радиатора, — это плавное расширение после входного отверстия, площадь которого меньше, чем передняя поверхность радиатора [9].

Для дальнейшего повышения производительности воздуховода и устранения заклинивания входные кромки могут быть закруглены, как передняя кромка тонкого аэродинамического профиля. Укорочение боковых понтонов за счет перемещения передней кромки назад не помогло обеспечить достаточное количество охлаждающего воздуха для радиаторов.

Турбулентный след от переднего колеса распространяется по мере движения вниз по потоку и тем больше охватывает воздухозаборники радиатора, чем дальше они находятся за колесами, пример представлен на рисунке 15.

После того, как боковые понтоны укоротили, появилось множество различных вариантов расположения барж, чтобы попытаться взять под контроль следы как переднего колеса, так и переднего крыла и переместить их в области, где они могут принести пользу, вместо того чтобы мешать охлаждению, входя в воздухозаборник радиатора.

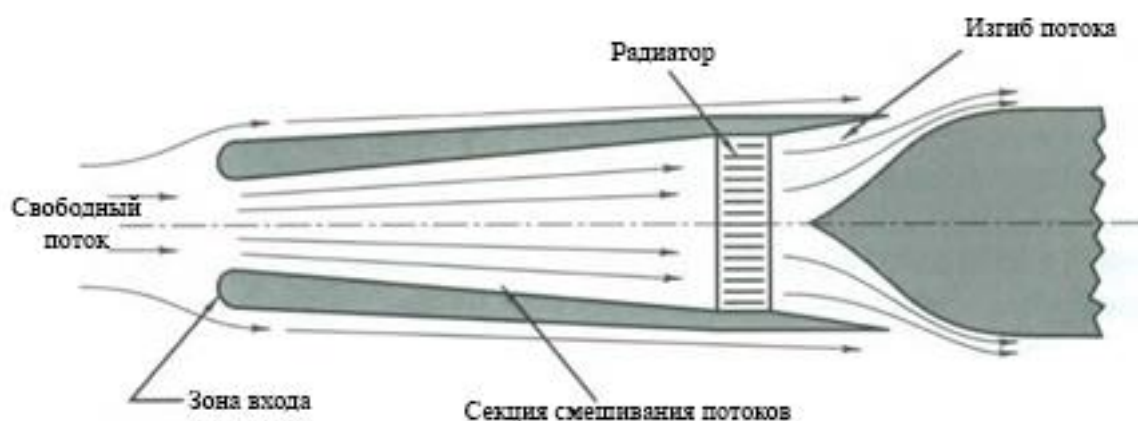


Рисунок 15 – Изогнутые края боковых понтонов помогают избежать срыва на входе

Алюминиевые сердцевинки радиаторов, используемые в большинстве автомобилей класса «Формула», относительно толстые и имеют высокие коэффициенты падения давления воздуха, поэтому не требуют прохождения через них воздуха с высокой скоростью. Вместо этого охлаждающий воздух должен эффективно замедляться и, таким образом, повышаться статическое давление между воздухозаборником и передней поверхностью радиатора. Внутренние каналы боковых платформ имеют форму расходящегося канала к одному или нескольким радиаторам в каждой боковой раме.

Давление за радиатором должно быть, как можно меньше, чтобы обеспечить максимально возможную разницу давлений в активной зоне.



Сообщение выпускных каналов радиатора с задней частью автомобиля гарантирует, что базовое давление, еще более сниженное за счет нижней части заднего крыла, используется для «вытягивания» воздуха из радиатора. Высокое давление перед колесами «проталкивает» воздух под автомобиль, заполняя и уменьшая создаваемое там желаемое низкое давление.

Поток воздуха с высокой скоростью вокруг внутренней кромки и вдоль боковой поверхности колеса и шины создает низкое давление, что желательно, поскольку препятствует притоку воздуха под область пола.

Установка радиатора под углом 40-50° внутри боковой понтонной — еще один эффективный способ улучшить его функциональность, так как он увеличивает размер сердцевины радиатора для большей теплопередачи и использует преимущества естественной конвекции воздуха. Как только более легкий нагретый воздух выходит из радиатора, он движется прямо вверх к верхней поверхности боковой части из-за разницы в плотности. Это ограничивает воздушный поток и создает области с низкой скоростью внутри боковой подушечки. Чтобы решить эту проблему, жабры могут быть размещены в области, где боковая часть блокирует поток воздуха, способствуя выбросу горячего воздуха из выхода радиатора и позволяя боковой части «дышать». Однако, несмотря на то что большая часть горячего воздуха выходит из боковых понтонных вверх и назад, по-прежнему создается большое количество восходящей силы из-за верхней формы боковых понтонных, которая вообще не создает прижимной силы. Весь прирост прижимной силы происходит только за счет ранее упомянутых выходов горячего воздуха (дымоходы, жабры и т. д.), включая положение и направление горячего воздуха и выхлопных газов.

## 2.6 Флип-апы

Открытые колеса являются полной противоположностью оптимальной аэродинамики, поскольку они способствуют значительному сопротивлению и подъемной силе (противоположность прижимной силе). Кроме того, они выпускают сильно турбулентный воздух, который практически бесполезен в качестве питателя для других аэродинамических устройств автомобиля. Подъем из-за открытых колес также является серьезной проблемой для всех гоночных автомобилей с открытыми колесами, поскольку правила запрещают закрывать колеса внутри кузова. Пример представлен на рисунке 16. Открытые колеса создают восходящие подъемные силы, которые уменьшают прижимную силу, создаваемую крыльями и другими конструкциями. Этот положительный подъем может снизить прижимную силу автомобиля класса «Формула» примерно на 11%.



Рисунок 16 – Пример флип-апов у команды Динамис из Милана

Кроме того, они мешают воздушному потоку вокруг заднего крыла. Чтобы решить эту проблему, на задней части боковых стоек перед задними колесами размещены откидные элементы, которые направляют воздух на задние колеса, создавая при этом некоторую прижимную силу и защищая

заднее крыло от воздействия грязного воздуха, поступающего от передних и задних колес. Флип-апы или же подъёмы, также используются для выравнивания воздуха с колесом и, таким образом, уменьшения сопротивления. Рядом с флип-апами, а иногда и интегрированными в них, находятся винглеты (небольшие аэродинамические поверхности с концевыми пластинами) для создания дополнительной прижимной силы.

#### Выводы по разделу

В данном разделе мы детально изучили и рассмотрели особенности каждого из элементов аэродинамики болидов класса «Формула». Ознакомились со спецификой и различиями между каждым из деталей, рассмотрели детально зависимости их от типов конструкций и их влияния на прижимную силу гоночного болида. В следующей главе мы детально рассмотрим понятие баланса аэродинамических сил и их распределения по болиду.

### 3 Распределение и баланс аэродинамических сил

На большинстве автомобилей класса «Формула» прижимная сила создается в основном (около 40–50%) за счет нижнего диффузора, в то время как переднее и заднее крылья производят примерно по 20–30% от общей прижимной силы, причем переднее и заднее крылья являются основными элементами настройки. Обратите внимание, как распределяется прижимная сила в передней, средней и задней частях автомобиля. Это приводит к относительно равномерному распределению нагрузки между передними и задними колесами. Настраивая переднюю и заднюю прижимную силу, вы изменяете центр давления автомобиля.

Центр давления ( $C_p$ ) представляет собой баланс прижимной силы на передней и задней осях, также известный как аэродинамический баланс. Расстояние между  $C_p$  и центром тяжести ( $C_g$ ) называется статическим запасом, и обычно требуется, чтобы положение  $C_p$  было как можно ближе к положению  $C_g$ . Слегка смещенный назад аэродинамический пакет, в котором  $C_p$  находится позади  $C_g$ , обычно используется для обеспечения стабильности на высоких скоростях. Проектирование с учетом хорошего аэродинамического баланса гарантирует, что автомобиль демонстрирует нейтральные характеристики управляемости, а не недостаточную или избыточную поворачиваемость в результате неравномерно распределенных аэродинамических нагрузок.

Прижимная сила должна быть сбалансирована между передней и задней, левой и правой частью автомобиля [4]. Из-за симметрии автомобиля баланс между левым и правым может быть легко достигнут, но достижение баланса между передней и задней частью — это совсем другое. Поток спереди сильно влияет на поток сзади автомобиля и наоборот. Прижимную силу необходимо регулировать в соответствии с характеристиками каждой гоночной трассы для различных заездов FSAE (выносливость, занос и т. д.) и динамическим поведением автомобиля.

Если у автомобиля сзади значительно больше прижимной силы, чем спереди, или даже если у него есть подъемная сила спереди, передняя часть автомобиля может ощущаться легче в определенных ситуациях на трассе. Эта легкость в передней части автомобиля может привести к недостаточной поворачиваемости просто потому, что передним колесам не хватает сцепления с дорогой по сравнению с задними. Большинство команд FSAE пытаются добиться увеличения передней и задней прижимной силы, сохраняя при этом правильный баланс между двумя силами, чтобы избежать каких-либо нежелательных проблем с управляемостью или сцеплением из-за неправильного баланса. Пример представлен на рисунке 17.

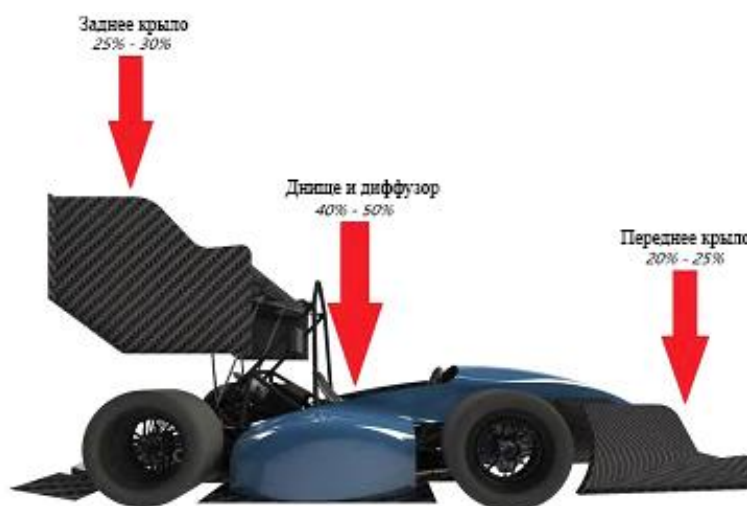


Рисунок 17 – Распределение и баланс аэродинамических сил

Еще одно преимущество балансировки прижимной силы заключается в том, что она может помочь уменьшить крен кузова при прохождении поворотов и наклон кузова при торможении или ускорении. Это, в свою очередь, помогает уменьшить внезапные колебания вертикальных сил, действующих на шины на пределе, повышая устойчивость автомобиля после действий водителя. Поведение автомобиля также становится более линейным вблизи предела сцепления, что способствует повышению управляемости водителем. Прижимная сила не только увеличивает динамические

характеристики, но и создает более стабильную среду поведения автомобиля для рулевого управления, газа и торможения.

В низкоскоростных поворотах для поддержания скорости требуется небольшая мощность, поэтому снижение лобового сопротивления почти не дает эффекта. В скоростных поворотах влияние лобового сопротивления может стать весьма значительным, однако оно составляет лишь 10% разницы по сравнению с той, которую можно достичь, уравнивая прижимную силу. Другими словами, создание прижимной силы для прижатия автомобиля к дороге при увеличении скорости не только способствует увеличению абсолютной скорости прохождения поворотов и, следовательно, абсолютных динамических характеристик, но и значительно улучшает качество управления транспортным средством, измеряемое реакцией на действия водителя и стабильностью транспортного средства на пределе возможностей.

Нарушение воздушного потока приводит к увеличению давления на соответствующую ось. Эта ситуация особенно проявляется во время прохождения поворотов. В случае, когда задняя ось несет большую нагрузку, передняя ось не может следовать по траектории, ожидаемой водителем, тем самым увеличивая радиус — мы имеем дело с эффектом недостаточной поворачиваемости. Противоположная же концепция, это - избыточная поворачиваемость, когда более подвержена пробуксовке задняя ось с более интенсивными условиями проскальзывания. Повышенное давление, возникающее за счет взаимодействия с потоком воздуха, приводит к более эффективному ускорению, но плохой баланс может привести к избыточной поворачиваемости. Баланс определяется суммированием моментов, создаваемых как прижимной силой, так и силой лобового сопротивления на их перпендикулярных длинах консолей относительно расчетного центра давления, который в данном случае принимается за положение на земле непосредственно под центром тяжести автомобиля, который обычно находится посередине колёсной базы. Для автомобиля класса «Формула» типичный аэродинамический баланс составляет примерно 45% прижимной

силы спереди и 55% сзади. Ниже представлен рисунок 18, схемы кузова используемой для оценки баланса сил.

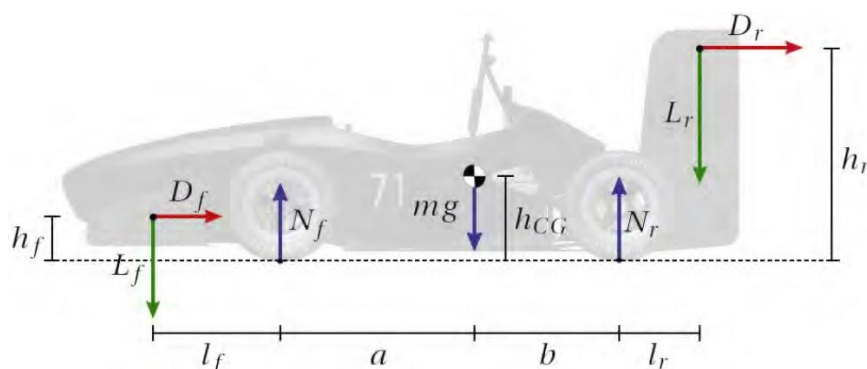


Рисунок 18 – Схема кузова автомобиля класса «Формула», используемая для оценки аэродинамического баланса

Когда прижимная сила и сопротивление уже известны для передней и задней части автомобиля, можно выполнить приблизительный расчет аэродинамического баланса автомобиля на основе диаграммы свободного тела. После анализа приложенных к автомобилю сил и моментов силу, действующую на задние шины ( $N_r$ ), можно найти с помощью приведенного ниже уравнения и, соответственно, рассчитать силу для передних шин ( $N_f$ ). Положения крыльев можно оценить, измерив перпендикулярное расстояние от точки баланса до предполагаемого центра давления для каждого крыла.

Автомобили FSAE в значительной степени ограничены при входе в поворот доступным задним сцеплением. В поворотах на низкой и средней скорости автомобилю требуется небольшое смещение задней оси по отношению к КП, это предотвращает избыточную поворачиваемость автомобиля при входе в поворот.

Слишком агрессивное переднее антикрыло в этих поворотах сделает машину слишком остrokонечной и уменьшит время прохождения круга, в то время как в более быстрых поворотах переднее антикрыло может вести машину вперед. Водители мягче входят в быстрые повороты, что создает меньшее поперечное ускорение на задней оси. Таким образом, задняя часть

редко выходит из поворота в быстрых поворотах. На более высоких скоростях это может быть центр тяжести, смещенный в сторону середины или вперед. Поскольку приложение прижимной силы к телу создаст лучшее сцепление с дорогой, нам нужно выяснить, как и где ее применять. В основном управляемость гоночного автомобиля описывается как избыточная поворачиваемость, недостаточная поворачиваемость или нейтральная. Избыточная поворачиваемость с точки зрения аэродинамики означает большую прижимную силу спереди (или меньшую прижимную силу сзади), в то время как недостаточная поворачиваемость будет означать большую прижимную силу сзади (или меньшую прижимную силу спереди), а нейтральная будет хорошей комбинацией обоих.

Торможение в поворотах может легко вывести автомобиль из равновесия. Под действием замедления передняя часть автомобиля больше нагружается (из-за переноса веса на переднюю часть), а из-за рулевого управления эта дополнительная нагрузка становится неуравновешенной за счет действия центробежной силы на внешний передний угол автомобиля. Это создает большую нагрузку на этот узел подвески и создает много дополнительной работы для этой шины, с которой приходится взаимодействовать. Когда это происходит, даже для заднеприводных автомобилей задняя часть автомобиля становится легче и с резкой разгрузкой диагонально противоположного колеса и узла подвески до неестественно нагруженного [22].

Этот эффект торможения обусловлен эффектом замедления двигателя. Это затрудняет сцепление задних шин с дорогой из-за уменьшения прижимной силы, и задняя часть автомобиля может легче спровоцировать избыточную поворачиваемость и начать обгонять переднюю часть. Применение тормозов во время поворота может даже привести к тому, что заднее колесо, которое движется внутри поворота, полностью потеряет контакт с дорогой.



Большая часть торможения осуществляется передними колесами, но очевидно, что все четыре колеса обеспечивают тормозное усилие. Увеличивая заднее сцепление без уменьшения переднего, можно увеличить общее сцепление при торможении автомобиля в целом, поэтому дополнительная задняя прижимная сила может положительно повлиять на степень сцепления задних колес при торможении. Сравнивая автомобиль класса без заднего крыла с полностью аэродинамическим автомобилем, добавление заднего крыла может создавать прижимную силу сзади, помогая решить проблему баланса передней прижимной силы и задней прижимной силы, но этот баланс требует рассмотрения передней прижимной силы и задней. прижимная сила одновременно. Благодаря созданию прижимной силы с таким же балансом между передней и задней частью, как и вес автомобиля, изменения характеристик рулевого управления от низких до высоких скоростей остаются под контролем. На более высоких скоростях это приводит к более линейному отклику. Более точное управление автомобилем помогает водителю глубже раскрыть потенциал автомобиля [35].

Несмотря на то, что крылья болидов класса «Формула» не испытывают больших изменений угла атаки при движении вперед, необходимо иметь как можно более широкий рабочий диапазон, чтобы иметь достаточно вариантов для настройки автомобиля. Заднее крыло часто используется для балансировки автомобиля после того, как установка переднего крыла была завершена, чтобы компенсировать любые возможные нежелательные характеристики автомобиля, которыми он наделен ранее существовавшими характеристиками управляемости. На рисунке 19 представлена схема распределения нагрузок на гоночный автомобиль при торможении.

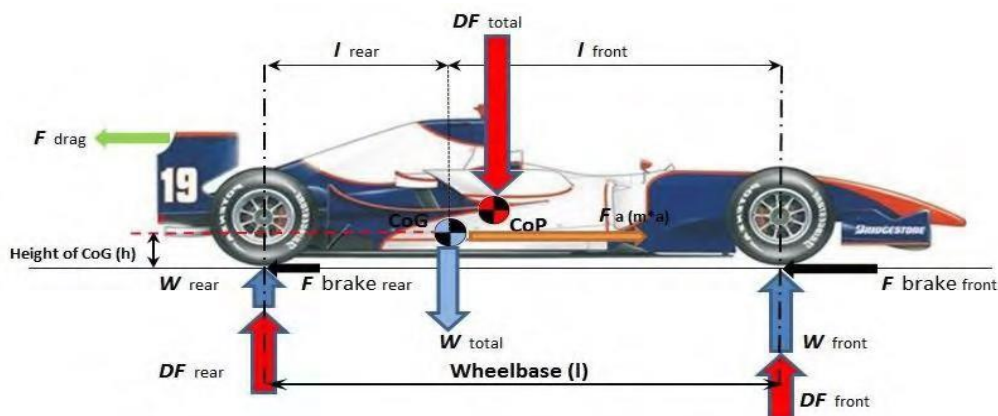


Рисунок 19 – Примерная схема кузова гоночного болида при торможении

Величина прижимной силы, создаваемая современными автомобилями класса «Формула», изменяет нагрузку на колеса примерно на 70% спереди и примерно на 90% сзади. Что касается подвески и шин, автомобиль кажется примерно в два раза тяжелее на конечной скорости, нежели на низких скоростях. Объедините это со 100% увеличением вертикальной нагрузки с низким дорожным просветом, и станет ясно, как аэродинамика может повлиять на характеристики автомобиля класса «Формула» даже во время торможения.

#### Вывод по разделу

В данном разделе мы детально рассмотрели понятие баланса аэродинамических сил и их влияние на конструкцию автомобиля во время езды или торможения. Рассмотрели понятие распределения сил и выявили наиболее сильные и слабые стороны различных конструкций.

## 4 Проведение теоретических расчетов перед этапом построения CAD-модели

### 4.1 Расчет тягово-динамических характеристик автомобиля

Исходные данные для проведения расчёта тягово-динамических характеристик автомобиля представим в таблице 1.

Таблица 1 – Данные для проведения расчета тягово-динамических характеристик автомобиля класса «Формула»

Параметр	Значение
Колёсная формула	4x2
Количество посадочных мест	1
Снаряженная масса автомобиля $m_0$ , кг	221,5
Максимальная скорость $V_{max}$ , км/ч (м/с)	140 (39,2)
Угловая скорость $\omega_e^{max}$ , рад/с (об/мин)	7500 (785)
Максимальная мощность двигателя $N_e^{max}$ , кВт	40
Максимальный крутящий момент двигателя $M_e^{max}$ , Н·м	56
Тип и размерность колеса	200/75R13
Коэффициент аэродинамического сопротивления $C_x$	0,3
Величина максимального преодолеваемого уклона $i$ , %	0,34
КПД трансмиссии $\eta_{тр}$	0,91
Габаритная ширина автомобиля $B$ , мм	1444
Габаритная высота автомобиля $H$ , мм	1136
Коэффициент сопротивления качению $f_0$	0,02
Передаточные числа:	
- Первая передача $U_1$	2,5
- Вторая передача $U_2$	1,75
- Третья передача $U_3$	1,33
- Четвертая передача $U_4$	1,095
- Пятая передача $U_5$	0,95
- Шестая передача $U_6$	0,87
- Главная передача $U_0$	2,19

Подготовка исходных данных для проведения расчёта тягово-динамических характеристик автомобиля.

Полная масса болида:

$$m_a = m_0 + m_{\text{ч}} \cdot n + m_{\text{б}} \cdot n , \quad (3)$$

где  $m_0$  – снаряженная масса болида, кг,

$m_{\text{ч}} = 75$  кг – масса одного человека,

$n$  – число пассажиров,

$m_{\text{б}}$  – вес багажа.

$$m_a = 221,5 + 75 \cdot 1 = 296,5 \text{ кг}$$

Полный вес болида:

$$G_a = m_a \cdot g , \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

$$G_a = 296,5 \cdot 9,81 = 2908,7 \text{ Н}$$

Распределение веса по осям примем равным 46% на передние колеса и 54% - на задние, в силу компоновки нашего болида, а именно заднеприводной.

Вес, приходящийся на ведущие колеса:

$$G_2 = 0,54 \cdot G_a = 0,5 \cdot 2908,7 = 1570,7 \text{ Н};$$

Вес, приходящийся на ведомые колеса:

$$G_1 = 0,46 \cdot G_a = 0,5 \cdot 2906,7 = 1338 \text{ Н}$$

Параметры обтекаемости автомобиля:

Коэффициент обтекаемости:

$$k = \frac{C_x \cdot \rho}{2} \quad (5)$$

где  $\rho = 1,293$  – плотность воздуха в нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$ .

$$k = \frac{0,3 \cdot 1,293}{2} = 0,194$$

Лобовая площадь автомобиля

$$F = 0,8 \cdot B \cdot H , \quad (6)$$

где  $B$  – габаритная ширина автомобиля, м,

$H$  – габаритная высота автомобиля, м.

$$F = 0,8 \cdot 1,44 \cdot 1,136 = 1,312 \text{ м}^2$$

Согласно выбранной ширине 200/75R13, радиус качения данной шины рассчитывается по формуле:

$$r_k = 0,5 \cdot d + \lambda_z \cdot H , \quad (7)$$

где  $d$  – посадочный диаметр шины, м,

$\lambda_z = 0,85$  – коэффициент вертикальной деформации,

$H$  – высота профиля шины, м.

$$r_k = 0,5 \cdot 0,4 + 0,85 \cdot 0,09 = 0,276 \text{ м}$$

Далее перейдём к расчёту внешней скоростной характеристики.

#### 4.2 Расчёт внешней скоростной характеристики автомобиля

Рассчитывается ВСХ двигателя по формуле:

$$N_e = N_{\max} \left[ \frac{\omega_e}{\omega_N} + \left( \frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^2 - \left( \frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^3 \right], \quad (8)$$

где  $\omega_e$  – текущее значение угловой скорости вала, рад/с,

$\omega_N$  – угловая скорость вала при максимальной мощности, рад/с,

$N_e$  – текущее значение эффективной мощности двигателя, Вт.

Для построения кривой эффективного момента  $M_e$  (Н·м) применяем формулу:

$$M_e = \frac{N_e}{\omega_e}, \quad (9)$$

Рассчитываемы зависимости  $N_e(\omega_e)$  и  $M_e(\omega_e)$ . Результаты расчетов сведены и представлены в таблице 2, и далее представляем в виде графика представленного на рисунке 20. Для данного двигателя, данные полученные при испытаниях со стенда, которые вы можете увидеть в таблице ниже.

Таблица 2 – Результаты с испытательного стенда двигателя

$n_e$ , об/мин	$\omega_e$ , рад/с	$M_e$ , Н·м
4300	450	52
4500	471	51
4700	492	50
5200	544	53
5500	575	54
6000	628	55
6300	659	56
6600	691	54
7200	753	54
7500	785	49

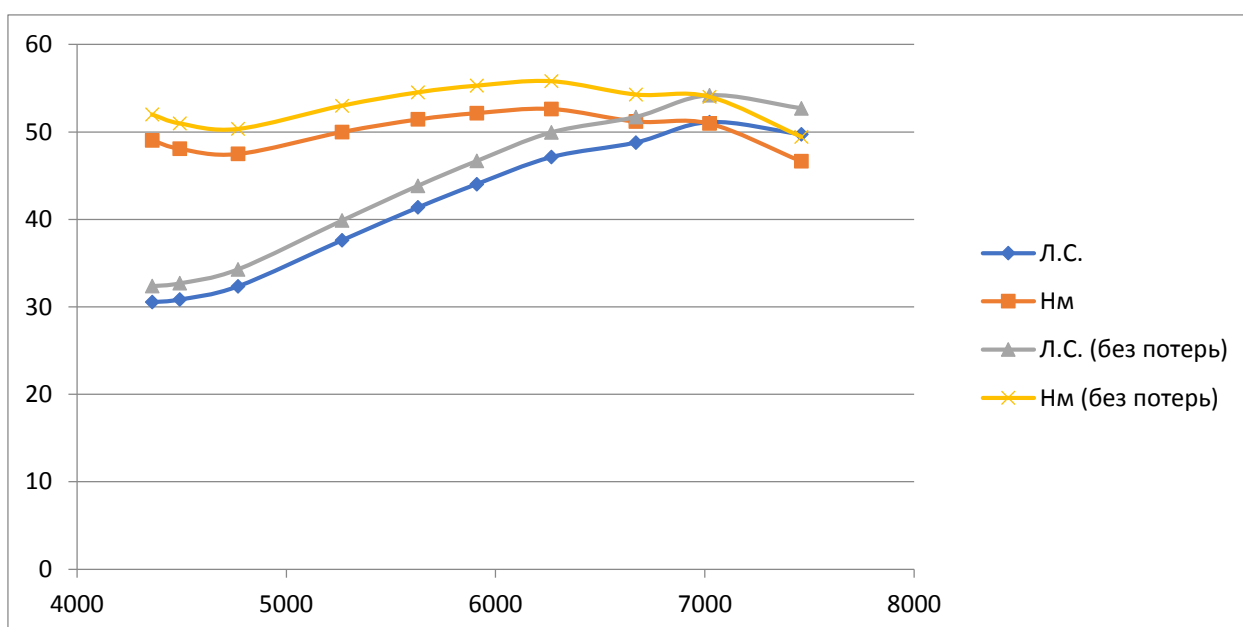


Рисунок 20 – Внешняя скоростная характеристика двигателя, график зависимости крутящего момента и мощности от частоты вращения со стенда

После этого, нам необходимо провести расчёт силового баланса автомобиля.

### 4.3 Силовой баланс автомобиля

Уравнение силового баланса:

$$F_T = F_d + F_B + F_{и} , \quad (10)$$

где  $F_T$  – сила тяги ведущих колес, Н,  
 $F_d$  – сила дорожного сопротивления, Н,  
 $F_B$  – сила сопротивления воздуха, Н,  
 $F_{и}$  – сила сопротивления разгону болид, Н (не учитываем).

Силу тяги рассчитывают по формуле:

$$F_{Ti} = \frac{U_{ki} \cdot U_0 \cdot M_e \cdot \eta_{тр}}{r_k} , \quad (11)$$

Сила аэродинамического сопротивления воздуха:

$$F_B = k \cdot F \cdot V_a^2 , \quad (12)$$

Сила дорожного сопротивления автомобиля (без учета сопротивления подъему):

$$F_d = G_a \cdot f , \quad (13)$$

где  $f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V_a^2}{2000}\right)$  – зависимость коэффициента трения качения от скорости движения болида.

Пользуемся выбранными при расчете ВСХ значениями  $\omega_e$ , приводя в соответствие с ними скорости болида.

На рисунке 21 представлен график тягового баланса автомобиля.



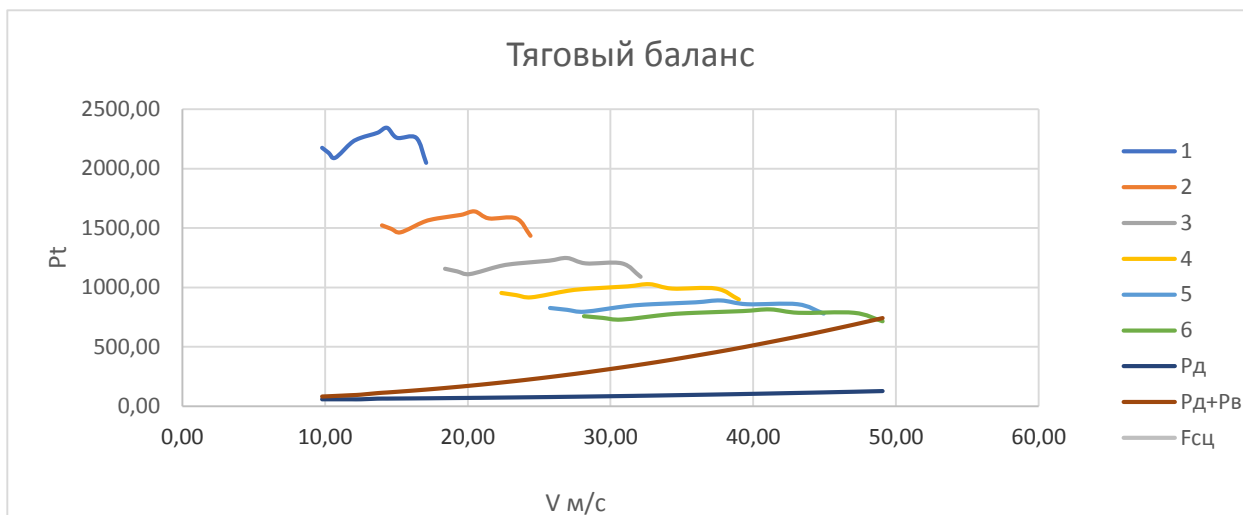


Рисунок 21 – Тяговый баланс автомобиля

После подсчёта тягового баланса, нам необходимо узнать динамическую характеристику болида.

#### 4.4 Динамическая характеристика болида

По формуле ниже и данным силового баланса рассчитываем и строим динамическую характеристику болида, которая является графическим изображением зависимости динамического фактора  $D$  от скорости движения при полной загрузке болида [1].

$$D = \frac{F_T - F_B}{G_a} \quad (14)$$

Данные расчета заносим и представляем графически на рисунке 22.

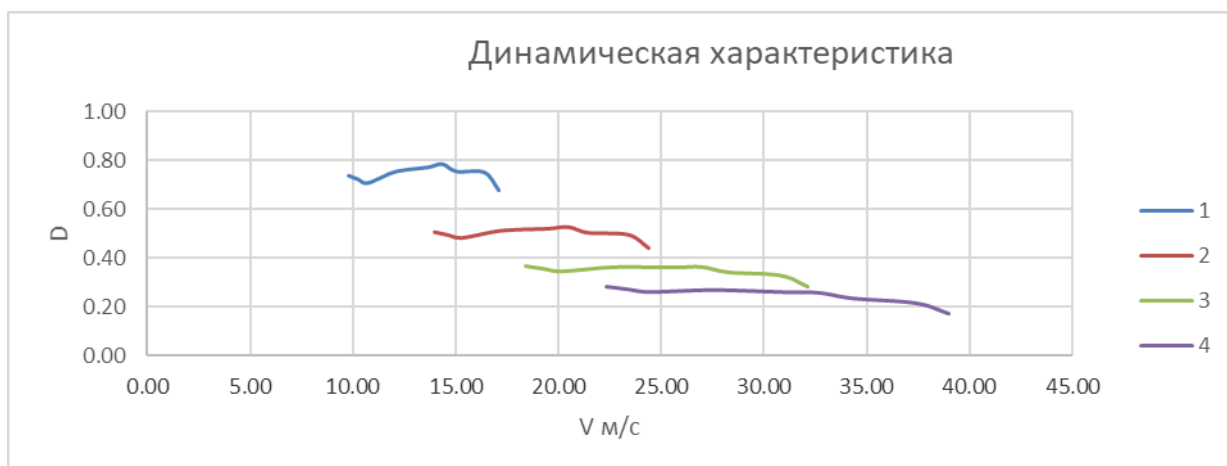


Рисунок 22 – Динамическая характеристика болида

Чтобы учесть влияние буксования ведущих колес, определяем динамический фактор по сцеплению:

$$D_{\text{сц}} \approx \frac{G_{\text{сц}} \cdot \varphi}{G_a} = \frac{1695,6 \cdot 0,8}{2908,7} = 0,46$$

$$G_{\text{сц}} = m_2 \cdot G_2 = 1,08 \cdot 1570 = 1695,6H$$

После проведения данных расчетов необходимо получить диаграмму мощностного баланса болида.

#### 4.5 Мощностной баланс болида

Уравнение мощностного баланса:

$$N_T = N_e - N_{\text{тр}} = N_f + N_n + N_v + N_d, \quad (15)$$

где  $N_T$  – тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам, Вт,

$$N_T = N_e \cdot \eta_{тр} = N_e \cdot 0,98 ,$$

$N_{тр}$  – мощность, теряемая в агрегатах трансмиссии, Вт;

$N_T = F_T \cdot V$  – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления подъему, Вт,

$N_B = F_B \cdot V$  – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления воздуха, Вт,

$N_D = F_D \cdot V$  – мощность, затраченная на преодоление силы инерции болида Вт.

На рисунке 23 представлена диаграмма мощностного баланса.

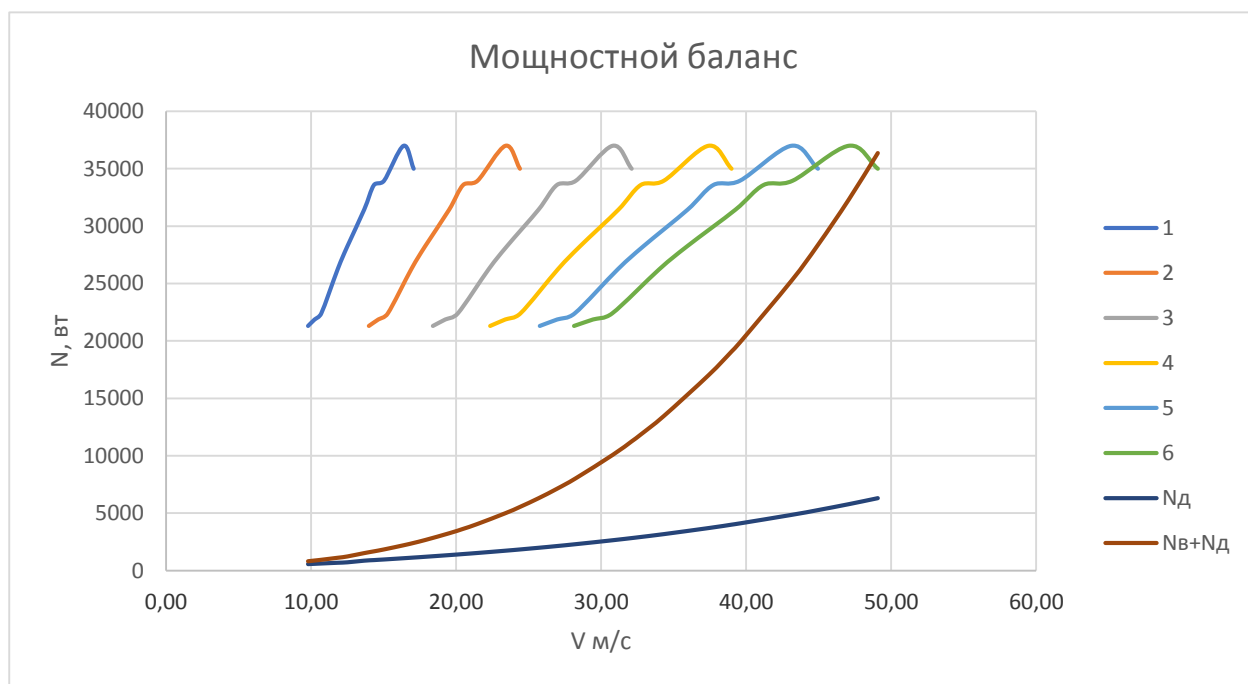


Рисунок 23 – Мощностной баланс болида

Исходя из полученных данных и проанализировав их, можно заключить, что болид имеет достаточный запас мощности для достижения точки преодоления силы сопротивления встречного потока воздуха вместе с аэродинамическим обвесом, и как следствие, можем переходить к подбору

аэродинамического профиля для полного моделирования аэродинамических элементов конструкции.

#### 4.6 Анализ аэродинамического профиля

Исходя из необходимых нам параметров, нами был выбран аэродинамический профиль, представленный на рисунке 24: Gottingen 804 (EA 8).

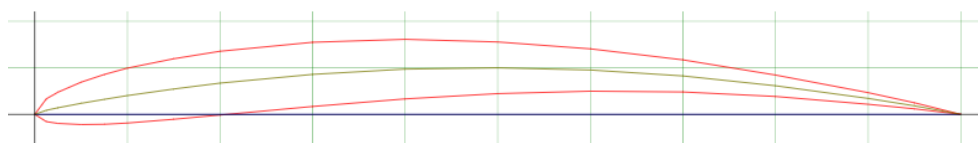


Рисунок 24 – Аэродинамический профиль Gottingen 804 (EA 8)

Также выведены и графики зависимости продуваемости потоком профиля зависимых от угла атаки и представлены на рисунке 25.

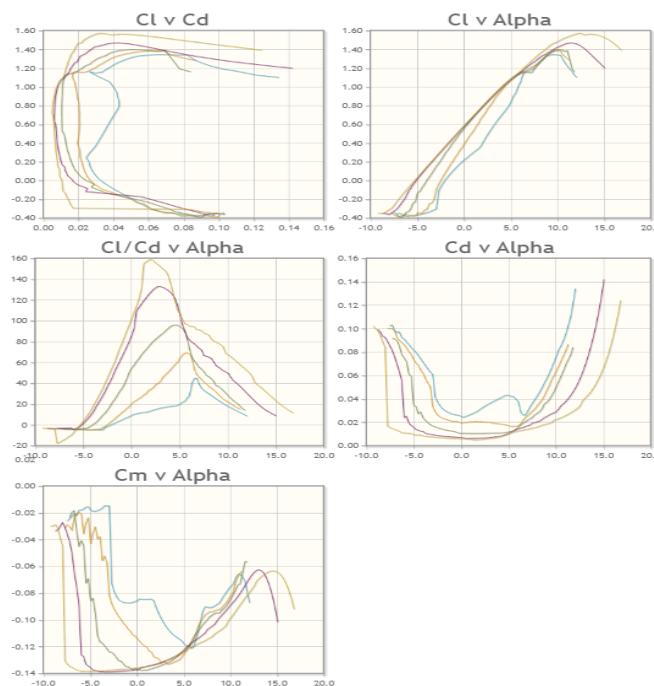


Рисунок 25 – Графики зависимости профиля от угла атаки

## Выводы по разделу

Рассчитав тягово-динамические характеристики, мы можем с уверенностью сказать, что мощности двигателя будет более чем достаточно для преодоления сил сопротивления воздуха. Из чего можно сделать вывод, что вариативность возможных установок различных аэродинамических пакетов может быть достаточно большой.

В следующем разделе мы рассмотрим основы CFD модулирования и чистки геометрии и чистки CAD-модели до состояния, в котором уже можно будет производить окончательные расчёты.

В дельнейшем нам предстоит провести и показать всю выполненную работу по заданным направлениям. Стоит также отметить, что выполнение следующих работ требует очень высокой как теоретической подготовки, так и требует высоких практических навыков работы как с CAD-моделями, так и с моделями CFD.

## 5 Настройка CFD модели

В этой главе дается точное описание простого и надежного способа моделирования CFD в области внешней аэродинамики автомобиля FSAE для разработки аэродинамического пакета автомобиля Scorpion G5 2024 года команды Togliatti Racing Team. По сравнению с аэродинамическими обвесами, о которых мы написали в разделе 2, этот набор аэродинамических элементов состоял из носового конуса с низким сопротивлением, днища с задним диффузором, двух симметричных боковых понтонов, а также переднего и заднего крыла, которые на данный момент находятся на стадии разработки и реализации [30].

Эти аэродинамические элементы моделировались и тестировались один за другим, пока не была создана и смоделирована полная модель CFD, дающая окончательные аэродинамические характеристики всего транспортного средства. Все модели САПР были разработаны с помощью программного обеспечения Solidworks с использованием в основном инструментов Surfaces, в то время как мощный инструмент ANSA использовался в качестве препроцессора, чтобы успешно справиться с «очисткой» очень сложной геометрии и создать высококачественную сетку с точной обработкой. Настройка и решение всех случаев CFD были выполнены с помощью программного обеспечения ANSYS-Fluent, а визуализация и оценка результатов в большинстве своём были выполнены с использованием усовершенствованного постпроцессора mETA. Пункты и подходы, перечисленные ниже, не претендуют на полноту или оптимизацию, это всего лишь рекомендации, основанные на личном опыте и недавних сопоставимых исследованиях.

Вычислительная гидродинамика (CFD) — это использование прикладной математики, физики, численного анализа и структур данных для решения и анализа проблем, связанных с потоками жидкости, и визуализации

того, как течет жидкость (воздух — это жидкость для аэродинамики), а также как она влияет на объекты. по мере прохождения потока.

Вычислительная гидродинамика основана на уравнениях Навье-Стокса. Эти уравнения описывают, как связаны скорость, давление, температура и плотность движущейся жидкости. Компьютеры используются для выполнения расчетов, необходимых для моделирования взаимодействия жидкостей и газов с поверхностями, определяемыми граничными условиями. С помощью высокоскоростных суперкомпьютеров можно достичь лучших решений. Первоначальная экспериментальная проверка такого программного обеспечения выполняется с использованием аэродинамической трубы, а окончательная проверка проводится в ходе полномасштабных испытаний. Текущее поколение пакетов CFD, как правило, способно давать точные решения для простых течений. Однако коды предназначены для решения очень сложных геометрических задач и решения сложных промышленных задач. Коды CFD, используемые с осторожностью знающим пользователем, представляют собой чрезвычайно ценный инструмент проектирования [31].

Интегрированное CFD-моделирование состоит из трех основных этапов: предварительной обработки, решения и постобработки, которые выполняются строго в указанном порядке. На этапе предварительной обработки исходная геометрия САПР «очищается» от любого типа проблемных поверхностей и делится на более мелкие фрагменты, что называется шагом создания сетки.

С сеткой точки измерения, где должен быть выполнен анализ, фактически определены. Таким образом, на этапе решения точно так же, как дискретизируется геометрия, одинаковыми являются уравнения Навье-Стокса для каждой ячейки, которые затем решаются, давая на этапе постобработки значения, полученные в виде цветных контурных графиков с использованием методов визуализации. Это может дать очень хорошее представление о местонахождении горячих точек, рециркуляции и мертвых зон. Таким образом, это не только качественное описание генерируемых значений, но и

количественное, которое может помочь пользователю проанализировать общие явления потока.

## **5.1 Чистка геометрии**

При настройке модели CFD обычно используется интересующая нас геометрия, которая импортируется из пакета автоматизированного проектирования (САПР) для использования в моделировании. Сложность каждой геометрии САПР зависит от точности импортируемых данных и напрямую связана с доступной вычислительной мощностью. Во время подготовки к моделированию CFD необходимо обеспечить последовательное определение полносвязной геометрии. Как правило, геометрия САПР, импортируемая в препроцессор, создается не там, а в одном из многих пакетов САПР. Первый основной шаг после импорта проекта САПР состоит из «очистки» геометрии для устранения любых ошибок, которые могут возникнуть в процессе проектирования САПР. Многие из этих ошибок можно обобщить как проблемы с переводом файлов. Экспорт этих файлов из программного обеспечения САПР в нейтральный формат файлов (IGES, STEP, SAT и т.д.), принятый препроцессором, может привести к искажению геометрии. В результате ошибок перевода между представлениями САПР могут возникнуть ошибки или различия в способах интерпретации геометрии.

В зависимости от серьезности проблемы иногда можно создать сетку даже с далеко не идеальным геометрическим представлением, однако в большинстве случаев эти проблемы необходимо решить до создания сетки. В некоторых случаях в геометрии существуют мелкие детали, которые при объединении в сетку приведут к очень маленьким элементам и потенциально огромному списку элементов. Небольшие кривые и поверхности иногда могут быть результатом деталей проектной твердотельной модели, которые могут быть ненужными для анализа или даже могут быть результатом небрежного построения модели САПР. В любом случае важно удалить или изменить эти



функции перед созданием сетки. Зачастую требуется, чтобы сборки деталей имели конформную сетку на границе раздела [34].

Для операции слияния часто требуются для соединения частей вместе, чтобы при построении сетки представление представляло собой единую непрерывную сетку. Ошибки моделирования, вызванные пользователем в пакете САПР, — еще одна проблема, которую необходимо исправить во время предварительной обработки. В пакете САПР пользователь может неправильно создать геометрию, что приведет к перекрытию некоторых частей или появлению небольших зазоров между частями, которые должны соприкоснуться. Если также допуск программного обеспечения для создания сетки меньше, чем допуск пакета САПР, это несоответствие в допуске может привести к тому, что последующие операции модификации геометрии в пакете создания сетки непреднамеренно создадут узкие элементы, с которыми, как правило, трудно и утомительно работать. Эта проблема допуска также вызывает проблемы смещения между соседними объемами сборок, препятствуя совместному использованию совпадающей геометрии для создания конформной сетки.

## **5.2 Создание жидкой области**

Во время предварительной обработки область жидкости, в которой будет происходить моделирование CFD, должна быть тщательно определена, чтобы обеспечить надежность результатов. Во внешней аэродинамике жидкая область имеет форму прямоугольного ящика и представляет собой виртуальную аэродинамическую трубу, в которой должно быть помещено интересующее тело, и должно быть обеспечено, чтобы между входом, геометрией и выходом всегда было достаточно места, чтобы граничные условия могут быть выполнены с включенной геометрией транспортного средства, поэтому рассеяние вихрей ниже по потоку от транспортного

средства не возмущает решение вверх по потоку, и давление в критической точке изменяется разумно.

Вход в аэродинамическую трубу обычно располагается примерно в 4-5 раз больше характерной длины перед геометрией, и на нем определяется входная скорость. Соответственно, выход из аэродинамической трубы размещается примерно в 8-10 раз на характерной длине позади геометрии и рассматривается как выход давления, а боковые стенки области располагаются примерно на 2-3х-кратной характерной длине дальше. Обычно отношение поперечного сечения транспортного средства к поперечному сечению аэродинамической трубы находится в определенном диапазоне. Это соотношение называется коэффициентом блокировки и должно быть менее 6% или даже менее 2% в зависимости от скорости на входе и типа результатов, которые пользователь хочет проверить в каждом случае. В результате влияние стенок домена жидкости на распределение давления и, следовательно, на коэффициент сопротивления невелико. В противном случае поле течения вокруг автомобиля будет нарушено стеновыми воздействиями.

Чтобы уменьшить общее количество ячеек и, следовательно, время вычислений, плоскость симметрии использовалась по центру всех геометрий. Симметричная вычислительная область может использоваться для уменьшения объема вычислений без существенной потери точности и может сэкономить до 50% и более времени выполнения моделирования. Кроме того, вы можете использовать нехватку памяти для более точного моделирования с большим количеством ячеек сетки, сгруппированных в интересующих областях. Однако не всегда предполагается, что симметричная модель также будет иметь симметричное поле течения. Например, при обтекании симметричного цилиндра в определенном диапазоне чисел Рейнольдса наблюдается срыв вихрей, который явно не является симметричным полем течения [19]. Однако для внешнего потока над автомобилями FSAE поток достаточно симметричен, чтобы запустить моделирование только на симметричной половинной модели. Симметричное моделирование также

неприменимо, если границы домена представляют собой стены реальной аэродинамической трубы. В этом случае при моделировании следует учитывать связанные с этим эффекты стенок. Моделирование с полной областью для транспортных средств рекомендуется, когда автомобиль тестируется в поворотах или если необходимо провести корреляцию с экспериментальными данными.

#### Выводы по разделу

Выше была описана краткая инструкция по подготовке модели к расчётам и модуляции в программе ANSYS. Сама подготовка занимает очень большое количество времени и знаний, что в свою очередь плодотворно влияет на каждого из специалистов по аэродинамике и позволяет с каждым разом выполнять данную работу эффективнее и быстрее.

## **6 Исследование влияния расчетных параметров аэродинамических элементов на прижимную силу**

После завершения всех CFD-симуляций для каждой части аэродинамического пакета последним шагом является CFD-моделирование моделей всего автомобиля и движущейся дороги, чтобы рассчитать окончательные аэродинамические характеристики каждой модели и сделать оценку их эффективности. Размещены три модели автомобилей, одна без аэродинамических устройств, одна с установленными на ней боковыми понтонами и днищем и последняя с полным аэродинамическим пакетом, включая переднее и заднее крылья. Все CFD-симуляции выполняются на скорости 60 км/ч с движущейся дорогой, а для сравнения окончательных результатов все модели тестируются на скоростях от 40 км/ч до 100 км/ч.

### **6.1 Модель без аэродинамического обвеса**

Первой моделью, представленной на рисунке 26, является автомобиль без установленного на нем аэродинамического устройства [27]. Цель этого моделирования — определить эффективность автомобиля без аэродинамических устройств и рассчитать его аэродинамические характеристики, такие как коэффициент лобового сопротивления и подъемной силы, чтобы оценить, насколько аэродинамические устройства улучшат эту ситуацию. Как уже было рассчитано при исследовании боковых понтонов, эта модель создает подъемную силу, а это означает, что аэродинамический пакет, который будет использоваться в каждом случае, также должен сначала преодолевать эту величину создаваемой подъемной силы для создания прижимной силы. Модель смоделирована на скорости 60 км/ч с движущейся дорогой с той же скоростью, и добавлено больше деталей для более точной оценки коэффициента лобового сопротивления.

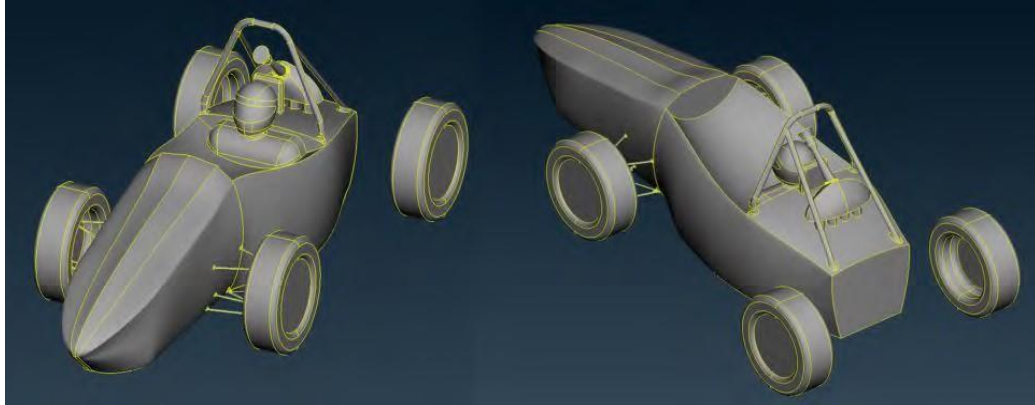


Рисунок 26 – CFD модель автомобиля без каких-либо аэродинамических устройств

Ожидается, что эта модель будет иметь наименьшее сопротивление из-за меньшей лобовой площади  $0,728 \text{ м}^2$  и отсутствия аэродинамических устройств, создающих прижимную силу.

Коэффициент аэродинамического сопротивления рассчитывается как  $0,426$ , коэффициент подъемной силы равен  $0,286$ , что дает силу сопротивления  $58,42 \text{ Н}$  и подъемную силу  $38,42 \text{ Н}$ , в результате чего общая аэродинамическая эффективность составляет  $0,67$ . На рисунке 27 показано распределение давления, создаваемое на контурной плоскости вдоль транспортного средства. На конце носового обтекателя прямо перед водителем ожидается, отрыв потока из-за открытия кабины.

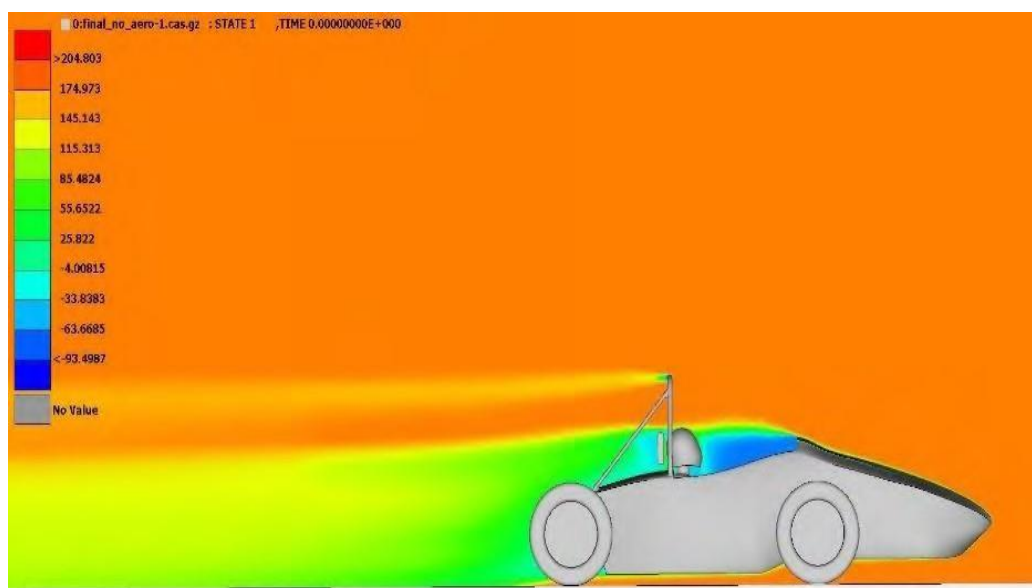


Рисунок 27 – Контур распределения давления модели без аэродинамического обвеса

Также ясно, что в нижней части автомобиля давление выше, чем в верхней части, что является причиной того, что автомобиль создает подъемную силу, в то время как область высокого давления позади автомобиля является причиной того, что сопротивление настолько низкое.

Распределение давления на поверхность автомобиля представленное на рисунке 28 подтверждает рассчитанные аэродинамические характеристики. Точки повышенного давления (193,5 Па) появляются на лобовых участках передних и задних колес, в критической точке носового обтекателя, на голове водителя и на основной кольце. В нижней части автомобиля распределение давления по поверхности автомобиля составляет от 79,5 Па до -376 Па, что значительно выше, и, учитывая движущуюся дорогу, эффект земли отсутствует, поскольку нет аэродинамических устройств, которые могли бы его использовать. Наконец, кажется, что центр давления перенесен на переднюю часть автомобиля, что также является нежелательной ситуацией, которая может привести к проблемам с избыточной поворачиваемостью [1].

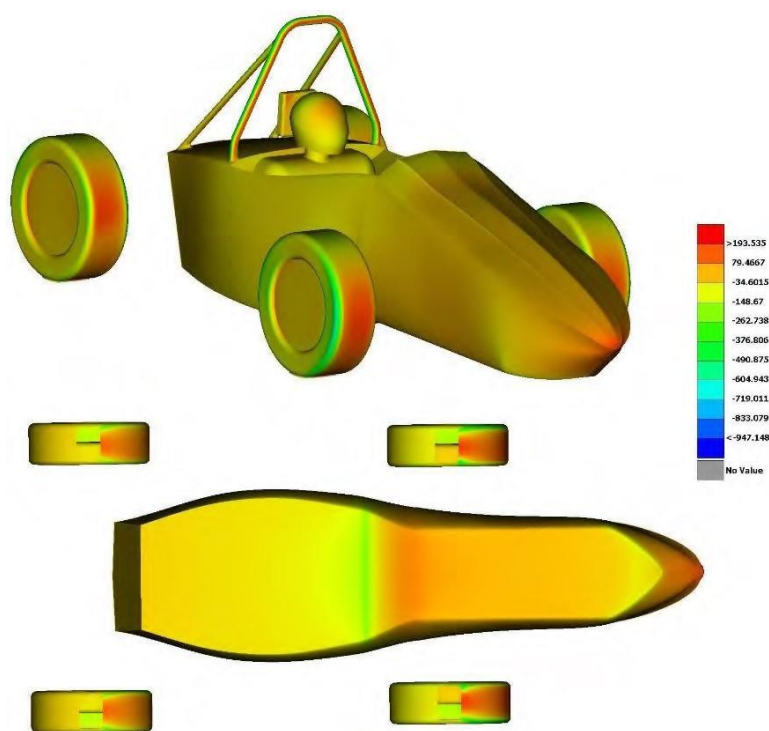


Рисунок 28 – Распределение поверхностного давления модели без аэродинамических элементов

Далее вычисляется область скоростей вокруг автомобиля и проецируется на контурную плоскость вдоль автомобиля. Синим цветом показаны области, в которых скорость воздуха значительно ниже, что свидетельствует об отрыве потока и увеличении сопротивления. На этом контуре более детально видно, что большой отрыв потока на кабине и за подголовником, а также по бокам передних колес срыв больше, чем у задних колес [27].

Учитывая вычисления области скоростей вокруг автомобиля, можно представить, как будет вести себя воздушный поток по отношению к автомобилю, распределение сопротивлений обозначаются различными цветами для более наглядного представления влияния на воздушный поток.

Области скоростей вокруг модели без аэродинамических элементов представлены на рисунке 29.

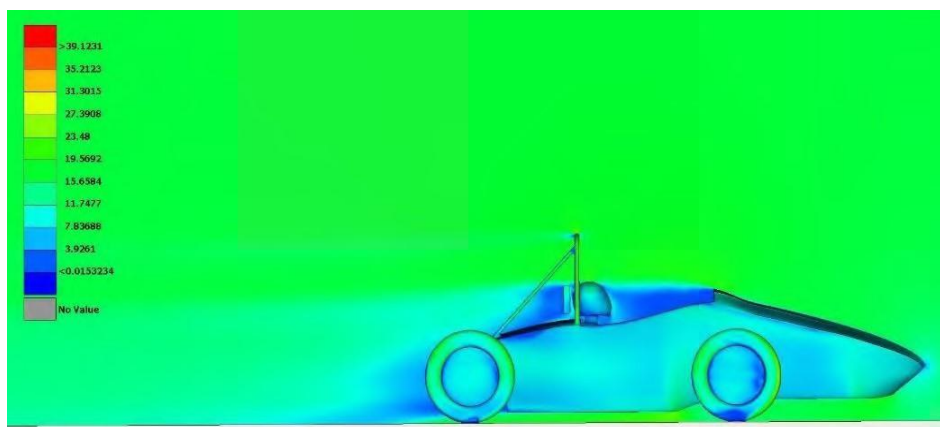


Рисунок 29 – Область скоростей вокруг модели без аэродинамических элементов

Линии потока воздуха также используются для визуализации воздушного потока вокруг транспортного средства.

На рисунке 30 показаны линии тока скорости, где красный цвет представляет более высокие скорости, а синие — низкие. Кажется, что поток воздуха плавно движется к передней части автомобиля, а выпуклость носового обтекателя направляет воздух над головой водителя.

В нижней части автомобиля поток снова ламинарный по всей поверхности и ускоряется всего до 22,5 м/с в передней части автомобиля, в то время как большое количество воздуха выходит из боковой и задней части автомобиля, увеличивая давление под машиной.

Кроме того, векторы скорости потока используются для более подробного отображения величины скорости в каждой области поверхности автомобиля. Синие векторы представляют точки, в которых скорость близка к нулю, а давление соответственно высокое, а зеленые и красные векторы показывают области, в которых величина скорости высока [31]. Области, такие как критическая точка носового обтекателя, кабина и лобовые области колес, характеризуются векторами с нулевой скоростью, в то время как на бортах колес и основной окружности величина выше, и разделение может происходить легче, модуляция показана на рисунке 31.



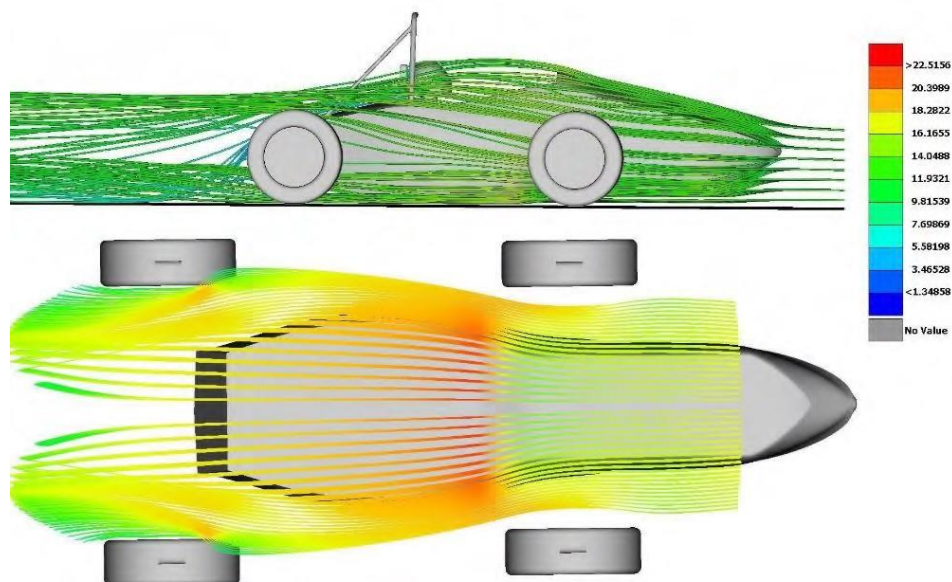


Рисунок 30 – Скоростная модель обтекаемости болида без аэродинамических элементов

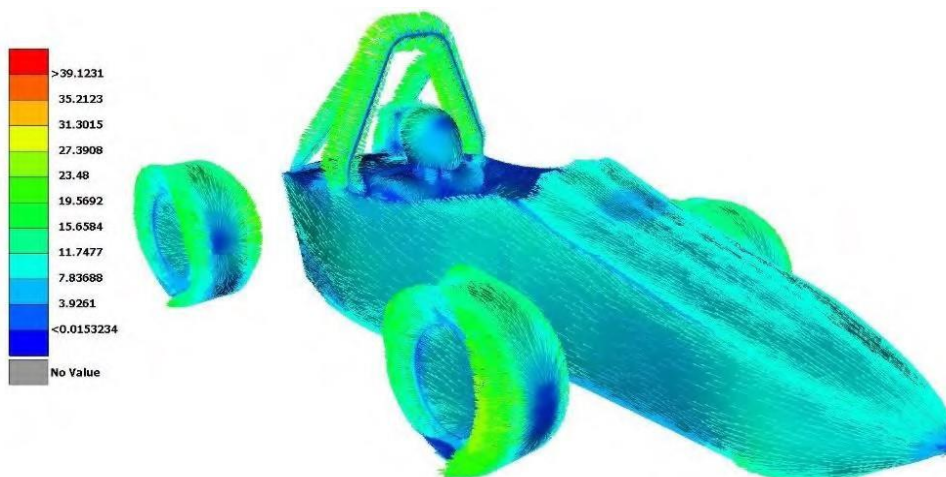


Рисунок 31 – Векторы скорости на поверхности модели без аэродинамических элементов

Наконец, интенсивность турбулентности, которая используется для визуализации областей вокруг автомобиля, где возникают сильные завихрения и срывы. На рисунке 32 с зелеными элементами объемной сетки показаны области, в которых интенсивность турбулентности выше 1,5%.

Эта цифра еще раз подтверждает, что самые высокие области турбулентности находятся за колесами и позади автомобиля.

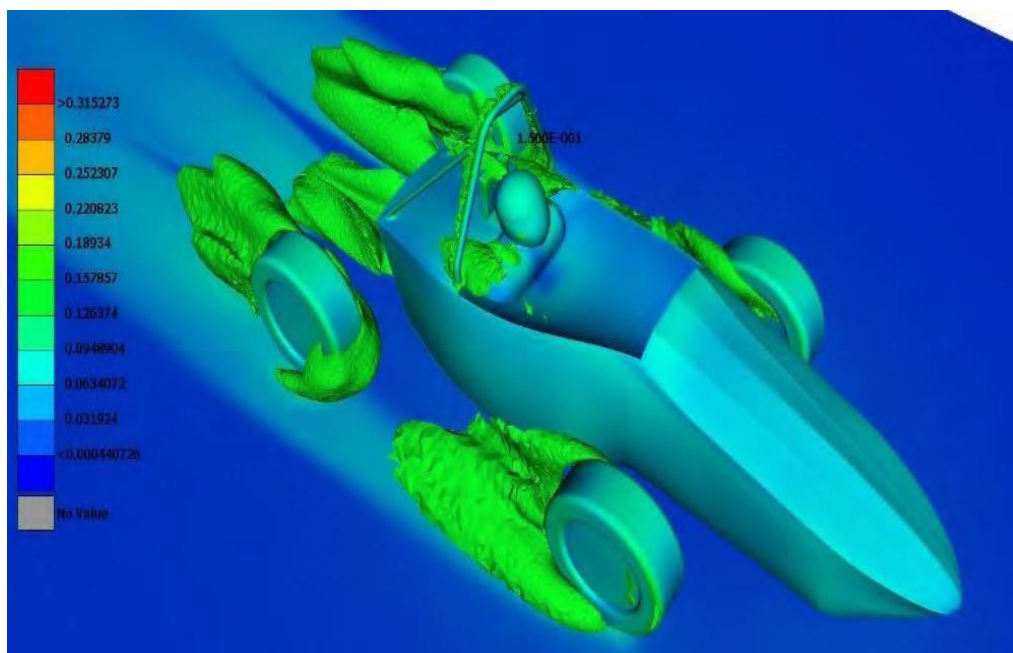


Рисунок 32 – Интенсивность турбулентности выше 1,5% для модели без аэродинамических элементов

Далее мы рассмотрим модель с аэродинамическим полом, диффузором и боковыми понтонами.

## 6.2 Модель с аэродинамическим дном, диффузором и боковыми понтонами

Следующей моделью, представленной на рисунке 33, для испытаний станет автомобиль с установленными на нем окончательными боковыми понтонами и окончательным днищем, которые были выбраны ранее. Автомобиль с этим аэродинамическим пакетом находится на этапе проектирования, его название Scorpion G5 который готовится к выходу в 2024 году. Моделирование CFD снова выполняется на скорости 60 км/ч, также с движущейся дорогой, чтобы рассчитать аэродинамические характеристики автомобиля. автомобиль и сравните их с результатами, полученными для автомобиля без аэродинамического устройства, и оцените, улучшится ли эффективность автомобиля [29].

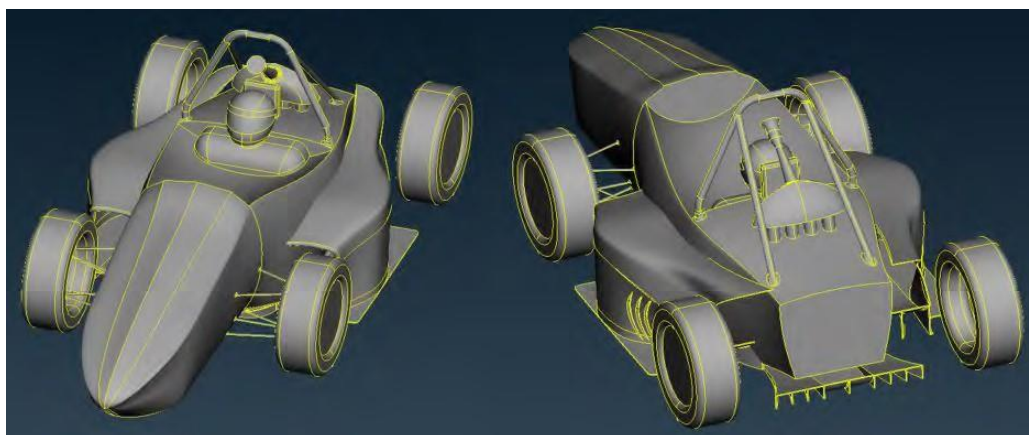


Рисунок 33 – CFD-модель автомобиля с днищем и боковыми понтонами

Добавление поддона и боковых понтонов привело к небольшому увеличению лобовой площади на  $0,8 \text{ м}^2$ , и ожидается, что из-за этих устройств сопротивление и прижимная сила также будут выше. Моделирование CFD привело к коэффициенту сопротивления  $0,532$ , коэффициенту подъемной силы  $-0,668$ , что дало силу сопротивления  $81,21 \text{ Н}$  и прижимную силу  $108,87 \text{ Н}$ , в то время как общая аэродинамическая эффективность составила  $1,26$ . Учитывая, что модель с голым автомобилем без каких-либо устройств создавала подъемную силу  $58,42 \text{ Н}$ , пакет днища и боковых понтонов преодолевал эту подъемную силу и создавал общую прижимную силу  $167,3 \text{ Н}$ . Распределение давления на контурной плоскости показано на рисунке 34, не сильно отличается от предыдущего, в то время как самая высокая область сваливания снова находится в кабине водителя, а повышенное сопротивление модели также видно в светло-синей области позади автомобиля.

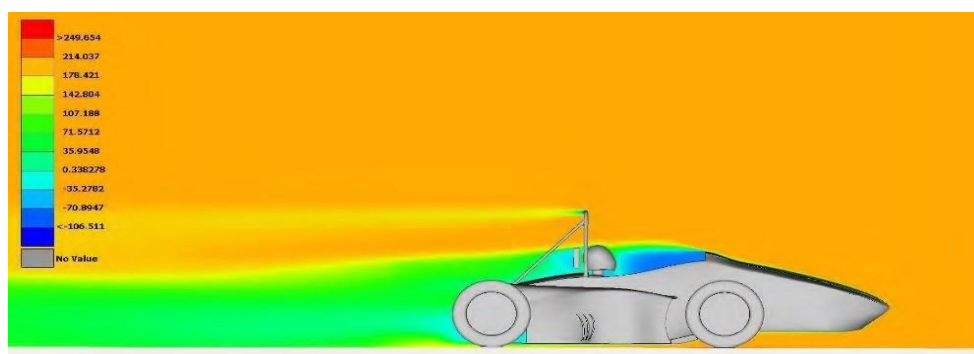


Рисунок 34 – Контур распределения давления с поддоном и боковыми понтонами

Распределение давления на поверхность автомобиля показано на рисунке 35. На верхней поверхности автомобиля кажется, что точки, где возникает самое высокое давление (185 Па), — это критическая точка носового обтекателя, лобовые области колес и некоторая область по бокам боковых понтонов. В днище автомобиля цифра совсем другая, так как у этой модели давление колеблется от 106 Па до -370 Па, что значительно ниже, чем у предыдущей модели. Кроме того, центр давления теперь переносится больше назад на выходы диффузоров, что позволяет избежать избыточной поворачиваемости.

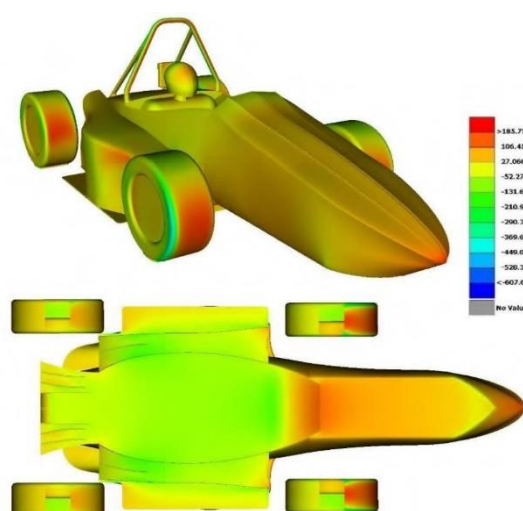


Рисунок 35 – Распределение поверхностного давления модели с поддоном и боковыми понтонами

Поле скоростей представлено на рисунке 36, также рассчитывается и проецируется на контурную плоскость вдоль вагона. Опять же кажется, что областями с низкой скоростью являются кабина и область за подголовником и колесами. Однако по бокам боковых понтонов на выходе из жабр кажется, что скорость воздуха значительно ниже, но воздух, выходящий из жабр, кажется, немного исправляет эту нежелательную ситуацию, а область отрывного потока за автомобилем больше.

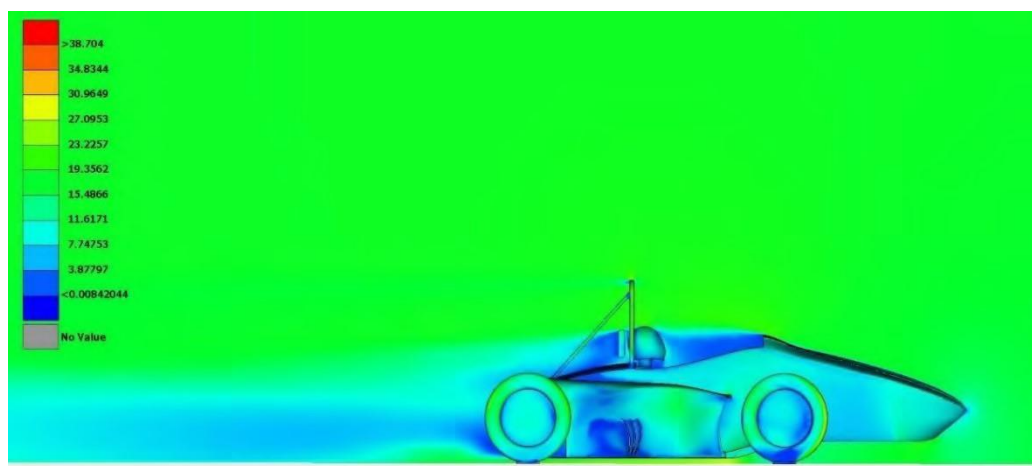


Рисунок 36 – Поле скоростей вокруг модели с поддоном и боковыми понтонами

Следующие линии тока используются для визуализации потока воздуха вокруг транспортного средства. Как показано на рисунках ниже, поток ламинарный в передней части автомобиля, при этом также видно, как приподнятая поверхность боковых понтонов создает прижимную силу и какое количество воздуха выходит из жабр боковых понтонов. На рисунке 37 автомобиля воздух явно ускоряется по всей поверхности и достигает максимальной скорости 27 м/с в диффузорах днища [14]. Также видно, как вертикальные створки среднего диффузора направляют небольшое количество воздуха за задние колеса для уменьшения лобового сопротивления.



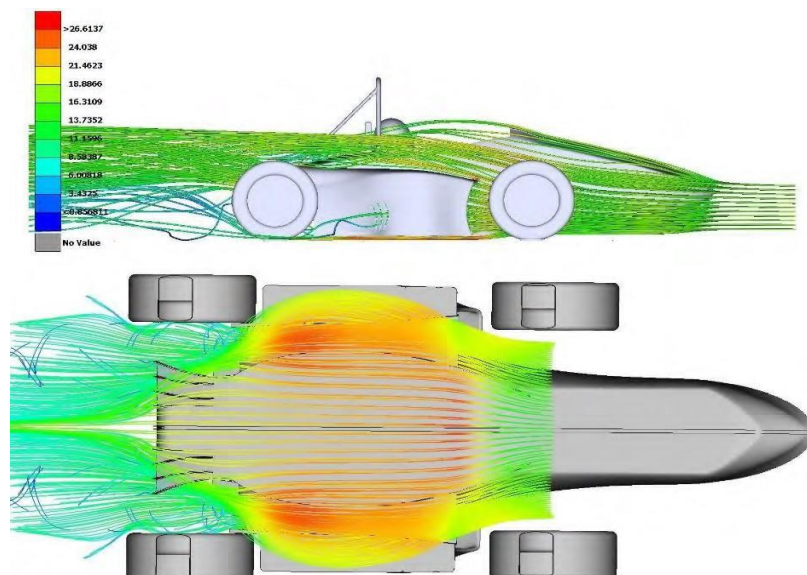


Рисунок 37 – Скоростная модель обтекаемости болида с нижним поддоном и боковыми понтонами

Кроме того, на рисунке 38 показано, как носовой обтекатель разделяет встречный воздух и направляет его прямо на боковые понтоны. Линии потока ламинарны, а турбулентный поток за передними колесами устранен из-за области низкого давления внутри боковых понтонов, которая всасывает больше воздуха и предотвращает создание сильных вихрей.

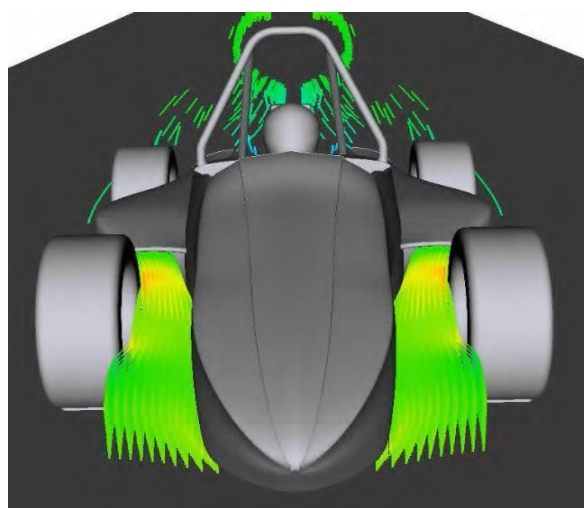


Рисунок 38 – Линии скоростного потока, проходящие через боковые понтоны

На рисунке 39 показано значение скорости в векторах, спроецированных на поверхность автомобиля.

Синие векторы снова показывают точку, где скорость близка к нулю, а более зеленые векторы выделяют точки, где скорость превышает 19 м/с.

Опять же, критическая точка носового обтекателя, лобовые области колес и площадь кабины экипажа характеризуются низкими значениями скорости, а такие участки, как борта колес, основной обод и верхняя поверхность носового обтекателя, имеют более высокие значения скорости. величина скорости, которая достигает пика 39 м/с.

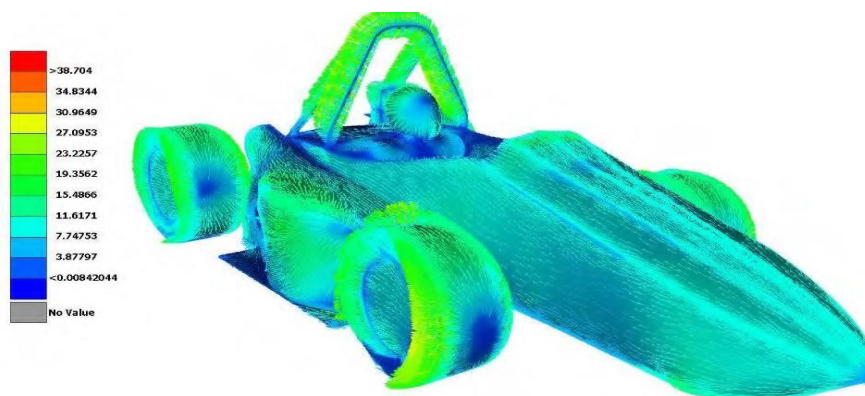


Рисунок 39 – Вектор скорости на поверхности модели с поддоном и боковыми понтонами

Наконец, интенсивность турбулентности выше 1,5% визуализируется с помощью зеленых элементов объемной сетки, чтобы предсказать области, где возникают сильные вихри и поток сильно турбулентный. Как показано на рисунке 40, опять же области за колесами и водителем являются областью, где возникает высокая турбулентность. Также видно, что сильные вихри начинаются с внутренней стороны передних колес и направляются прямо в верхнюю сторону боковых понтонов, а вихри с меньшей интенсивностью возникают также на выходе из жабр и на верхней поверхности бокового понтона без оказывающие какое-либо существенное влияние.

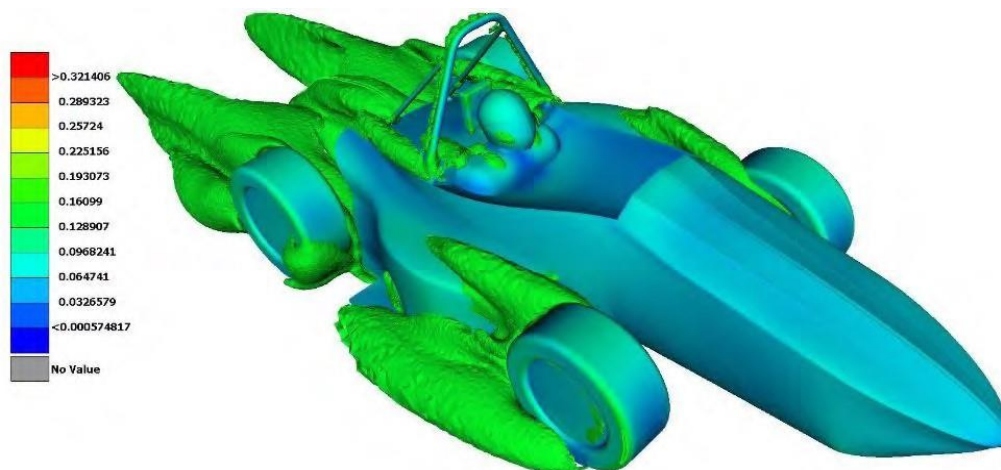


Рисунок 40 – Интенсивность турбулентности выше, чем 1,5% модели с днищем и боковыми понтонами

Следующей мы примем к рассмотрению модель с полным аэродинамическим обвесом.

### 6.3 Модель с полным аэродинамическим обвесом

Последней моделью, которую предстоит испытать, является автомобиль с установленным на нем полным аэродинамическим пакетом. Модель представленная на рисунке 41 такая же, как и предыдущая, с боковыми понтонами и днищем, с той лишь разницей, что добавлены переднее и заднее антикрыло, которые были выбраны ранее. Моделирование CFD выполняется на скорости 60 км/ч с движущейся дорогой с той же скоростью. Цель этого моделирования — проверить влияние использования переднего и заднего антикрыла на аэродинамическую эффективность автомобиля и оценить, может ли это улучшить поле потока вокруг автомобиля. Кроме того, необходимо также проверить эффективность переднего и заднего антикрыла соответственно, поскольку они установлены на автомобиле, и поток, достигающий их, совершенно различен.



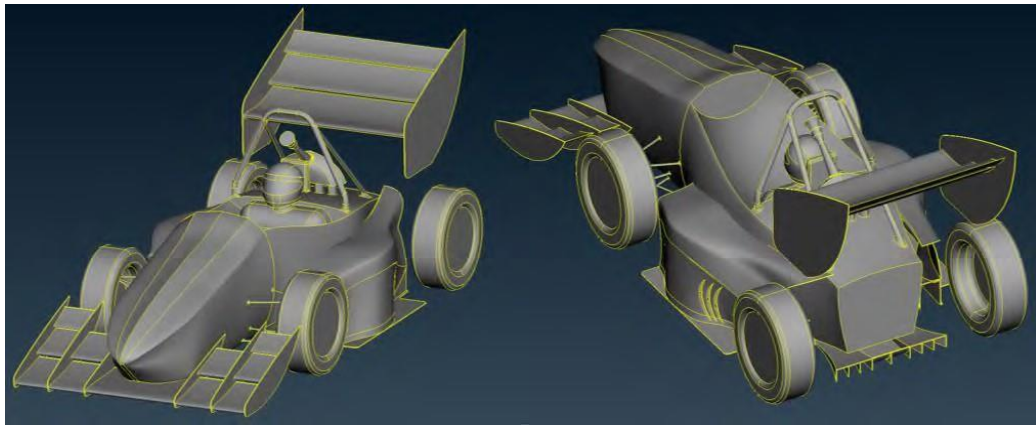


Рисунок 41 – CFD модель автомобиля с полным аэродинамическим обвесом

Новая модель с добавлением переднего и заднего антикрыла, очевидно, имеет наибольшую лобовую площадь  $1,02 \text{ м}^2$  по сравнению с предыдущими моделями. Результаты CFD показали, что автомобиль с полным аэродинамическим пакетом имеет коэффициент подъемной силы  $-1,898$ , коэффициент аэродинамического сопротивления  $0,82$ , что приводит к высокой эффективности  $2,31$ . Модель создает общую прижимную силу  $342 \text{ Н}$ , что в три раза выше, чем у предыдущей модели, в то время как сопротивление значительно увеличилось, как и ожидалось, до  $148 \text{ Н}$ . Из контура давления на рисунке 42 видно, что распределение давления полностью изменилось по сравнению с предыдущими моделями.

Низкий и высокий пики давления теперь значительно выше, но из-за используемого масштаба они не четкие. Опять же, площадь кокпита имеет наибольший срыв, в то время как заднее крыло оказывает огромное влияние на распределение давления за автомобилем, и также ясно, как небольшой отрыв основного обруча влияет на поток, достигающий заднего крыла. На передней части автомобиля видно, что давление в нижней части носового обтекателя значительно ниже, что, безусловно, может повлиять на эффективность днища.



Рисунок 42 – Контур распределения давления модели с полным аэродинамическим обвесом

Распределение давления также рассчитывается и визуализируется на поверхности автомобиля. Как показано на рисунке 43, критическая точка носового обтекателя, передняя часть задних колес и верхние стороны крыльев испытывают наибольшее давление от 97 Па до 212 Па.

Интересно, как добавление переднего антикрыла устранило высокое давление, которое создается на лобовую область передних крыльев, а значит, успешно отклоняет встречный воздух от удара о колеса.

В нижней части автомобиля пик низкого давления составляет около -930 Па и его можно увидеть в нижней части переднего и заднего крыльев, в то время как по всей поверхности днища распределение давления ниже -358 Па.

Центр давления теперь переносится больше вперед из-за области низкого давления, которая создается на переднем крыле из-за эффекта земли, но добавление заднего крыла и диффузора удерживает центр давления близко к центру масс прямо под водителем, что позволяет избежать избыточной поворачиваемости в случае недостаточного поворота рулевого колеса [20].

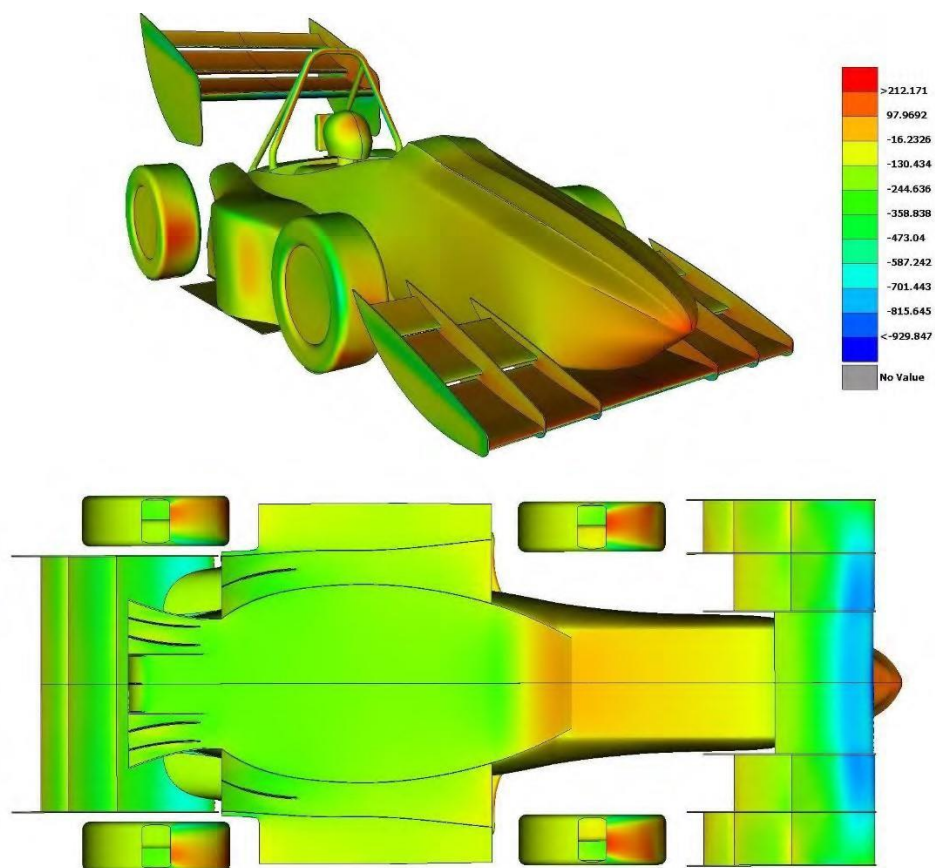


Рисунок 43 – Распределение поверхностного давления модели с полным аэродинамическим пакетом

Поле скоростей вокруг автомобиля представленное на рисунке 44, визуализируется контурной плоскостью, где синим цветом обозначены области, где скорость ниже 3 м/с, а красным цветом — области, где скорость выше 23 м/с и поток ускоряется. Как видно на рисунке ниже, отрыв потока происходит в районе кабины, в районе за водителем и по бокам боковых понтонов. Интересно, как срыв потока по бокам передних колес устранен за счет переднего антикрыла и перенесен на борта боковых понтонов.

Другими областями, где происходит срыв потока, являются стороны заднего и переднего крыльев, что связано с тонкими концевыми пластинами, разделяющими поток.

Наконец, поток ускоряется непосредственно под передним крылом, где достигает пика 33 м/с, сохраняя при этом высокую скорость 20 м/с по всей поверхности поддона и снижая давление.

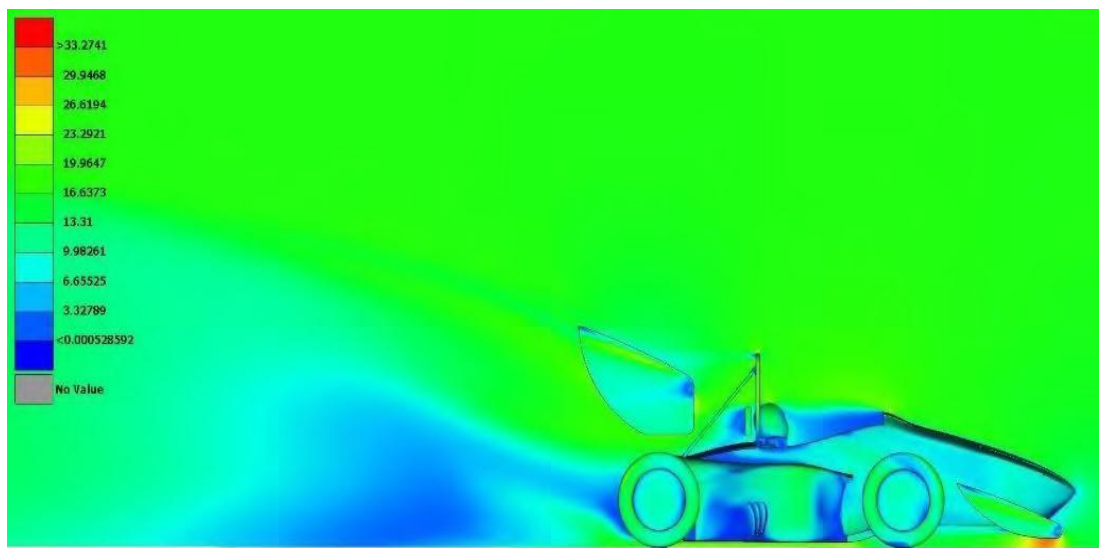


Рисунок 44 – Поле скоростей вокруг модели с полным аэродинамическим пакетом

Скоростные линии ниже используются для визуализации траектории движения воздушного потока вокруг автомобиля. Красные линии тока представляют точки, где скорость воздуха выше 33 м/с, а синие — точки, где скорость ниже 7 м/с.

Понятно, что переднее крыло использует эффект земли, и поток там ускоряется и достигает пика 33 м/с, в то время как поток воздуха в поддон значительно выше, чем в предыдущих случаях. Переднее крыло также направляет некоторое количество воздуха на внутреннюю сторону заднего крыла, что может быстро повысить его эффективность [9].

Наконец, заднее крыло само по себе получает наибольшее количество воздуха сзади и ускоряет его до 20 м/с, создавая при этом сильные вихри, которые являются основной причиной увеличения сопротивления. На рисунке 45 представлены обтекаемые линии модели.

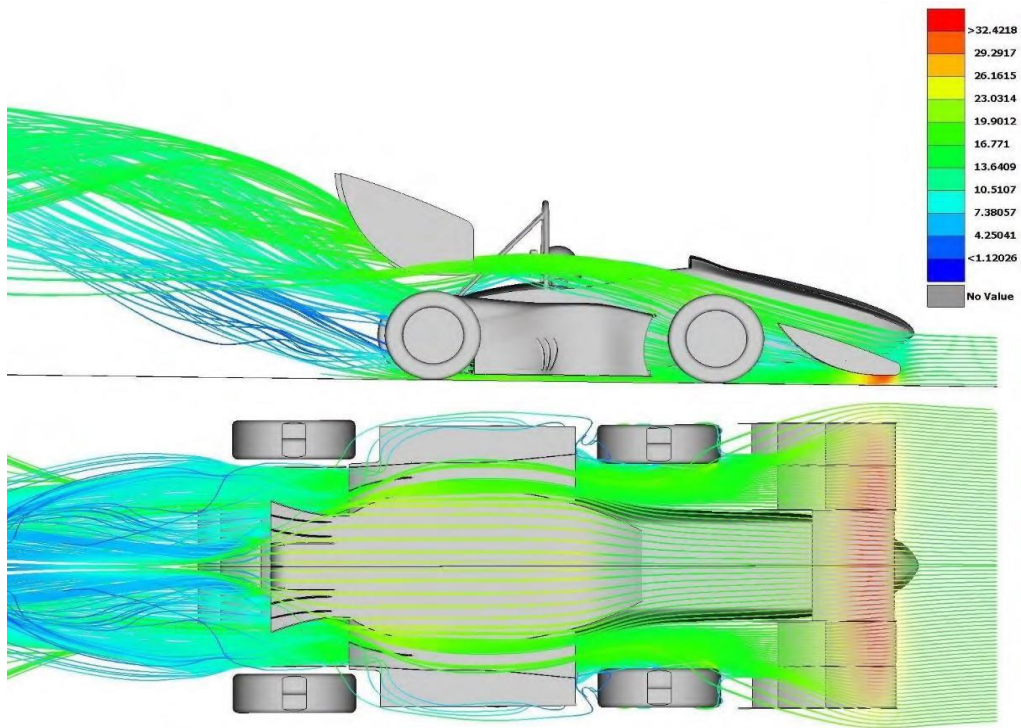


Рисунок 45 – Скоростная обтекаемость модели с полным аэродинамическим обвесом

На рисунке 46 более подробно показаны линии обтекания переднего крыла.

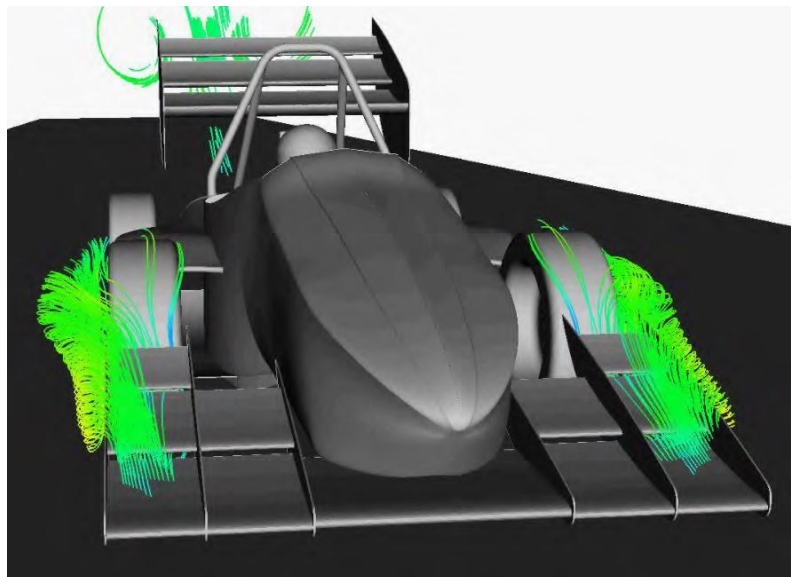


Рисунок 46 – Обтекаемость переднего крыла



Понятно, насколько эффективно работает часть с тремя элементами перед передними колесами, так как она создает сильные вихри, которые избегают контакта с передними колесами и предохраняют поток от отрывного и турбулентного. Эти вихри направляются именно в область за передними колесами, уменьшая тем самым образующееся там сопротивление, а когда достигают задней части автомобиля, то всасываются из области значительно низкого давления под задним крылом и улучшают его эффективность, т.к. еще больше воздуха ускоряется под аэродинамическими профилями крыла [26].

Кроме того, на рисунке 47 показана форма потока, достигающего заднего крыла. Эта цифра подтверждает, что на обтекание заднего крыла влияют многие части автомобиля, расположенные спереди, и это оказывает огромное влияние на эффективность заднего крыла. Ниже, видно, как на поток сильно влияет зона кабины, водителя и подголовника, и он разделяется, создавая вихри, которые устремляются под заднее крыло и взаимодействуют там с набегающим потоком, уменьшая его скорость.

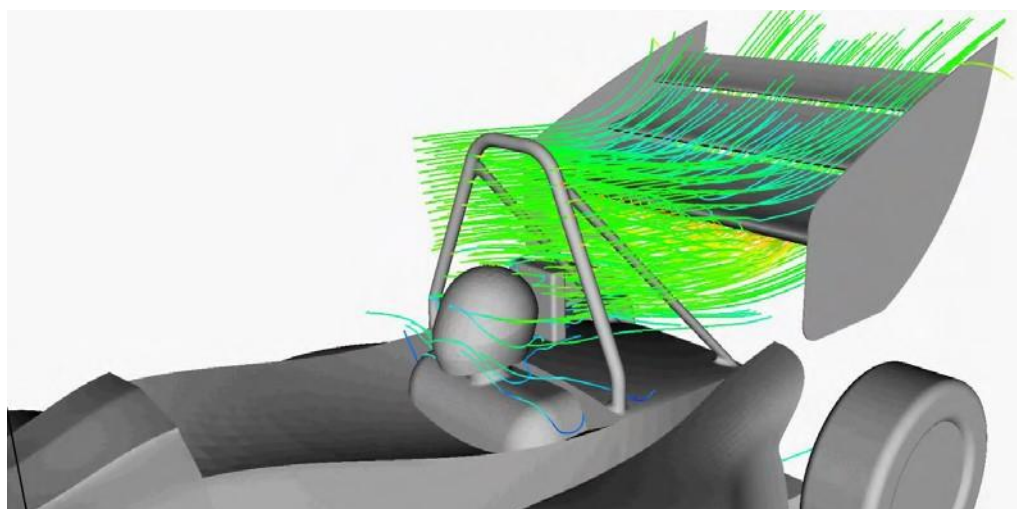


Рисунок 47 – Обтекаемые линии скорости потока достигают заднего крыла

Векторы скорости представляют результирующую силу в направлениях X, Y и Z, а цвет показывает величину. Векторы синего цвета представляют точки, в которых результирующая величина скорости меньше 6 м/с, а красные векторы показывают точки, где скорость находится в пределах 16–33 м/с.

На рисунке 48 у передней кромки переднего крыла вектор скорости достигает своего максимального значения, при этом также видно, что векторы направлены на днище автомобиля, а это означает, что воздух, проходящий под передним крылом, направляется в днище. По торцевым сторонам переднего крыла видно, что генерируются сильные вихри, так как векторы там желтые и их направление колеблется [32].

Векторы скорости во фронтальной области передних колес теперь направлены в одном направлении, а их цвет показывает, что поток там меньше взаимодействует, так как переднее колесо отклоняет воздух и предотвращает его контакт с колесами. В критической точке носового обтекателя все векторы окрашены в синий цвет, так как поток имеет почти нулевую скорость, а также скорость в верхней части основного элемента переднего крыла снова низкая, так как наибольшее количество воздуха направляется под аэродинамический профиль.

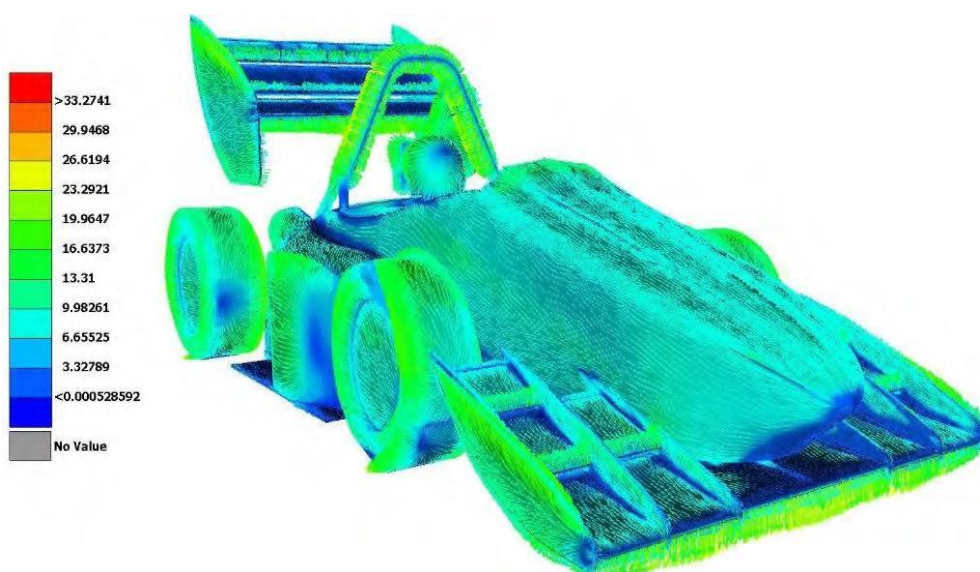


Рисунок 48 – Векторы скоростей на поверхности модели с полным аэродинамическим обвесом

Наконец, на рисунке 49 зелеными элементами объема показаны области, в которых интенсивность турбулентности превышает 1,5%. Как видно, переднее крыло уменьшило турбулентность за передними колесами и на

внешней поверхности боковых стоек, в то время как наибольшая интенсивность наблюдается в задней части автомобиля, где слабость заднего крыла способствует созданию больших турбулентностей. вихри с интенсивностью выше 3%.

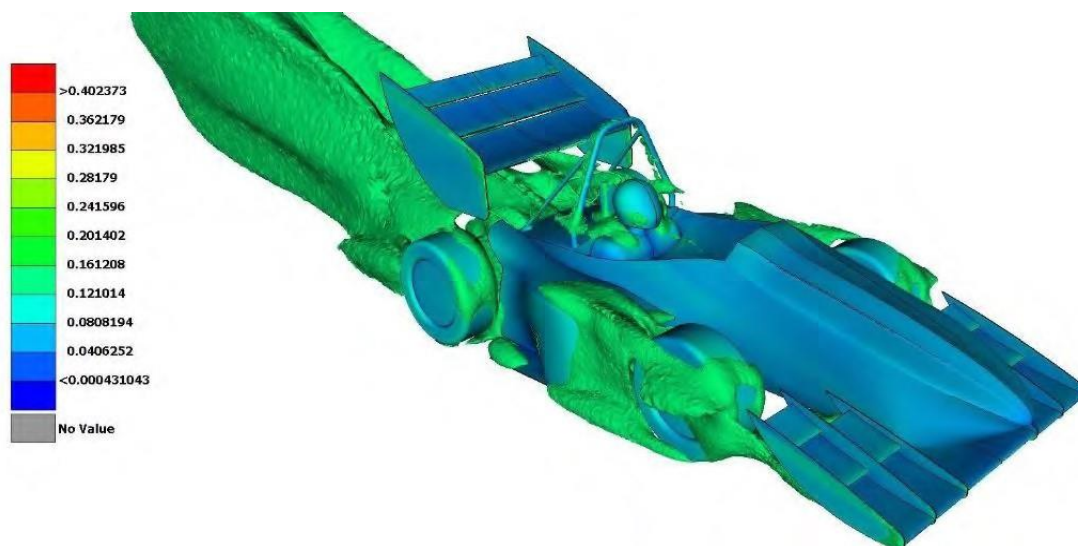


Рисунок 49 – Интенсивность турбулентности выше, чем на 1,5% у модели с полным аэродинамическим обвесом

Исходя из полученных результатов, необходимо перейти к сравнению наших теоретических данных и данных, полученных в результате произведённых расчетов.

#### 6.4 Сравнение результатов

Последним шагом является сравнение результатов CFD между предыдущими моделями автомобилей, чтобы сделать вывод об эффективности каждого аэродинамического пакета. Как видно из таблицы ниже, автомобиль с полным аэродинамическим пакетом имеет наивысший коэффициент полезного действия 2,31, что примерно в два раза выше, чем при использовании только днища и боковых понтонов, и в три раза выше по сравнению с автомобилем без каких-либо устройств. Это также видно из



коэффициентов сопротивления и подъемной силы, а также величины прижимной силы и сопротивления, создаваемых каждой моделью. Результаты сравнения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сравнения

Финальные модели	Площадь (м <sup>2</sup> )	Подъемная сила (C <sub>L</sub> )	Сопротивление воздуха (C <sub>D</sub> )	Прижимная сила (N)	Тяга (N)	Отношение C <sub>L</sub> /C <sub>D</sub>
Без аэродинамического обвеса	0,728	0,286	0,426	-38,42	58,42	0,67
Пол и боковые понтоны	0,799	-0,668	0,532	108,87	81,24	1.26
Полный обвес	1,019	-1,898	0,82	342,46	148,04	2,31

Чтобы дополнительно проверить эффективность каждой модели на разных скоростях, CFD-моделирование выполняется для скоростей от 40 до 100 км/ч, а на приведенной ниже диаграмме показана величина прижимной силы для каждого случая. Согласно этой диаграмме, автомобиль без какого-либо аэродинамического устройства создает подъемную силу для всех этих скоростей, поскольку его коэффициент подъемной силы положителен и достигает пика -100 Н на конечной скорости. Далее модель с днищем и боковыми понтонами имеет постепенное увеличение генерируемой прижимной силы, которая начинается со 150 Н на скорости 40 км/ч и достигает пика в 240 Н на скорости 100 км/ч.

Наконец, у модели с полным аэродинамическим пакетом явно наблюдается постепенное увеличение прижимной силы: от 150 Н на скорости 40 км/ч она достигает пиковых 870 Н на конечной скорости 100 км/ч, что примерно в пять раз выше, чем у предыдущей модели, представлено на рисунке 51.

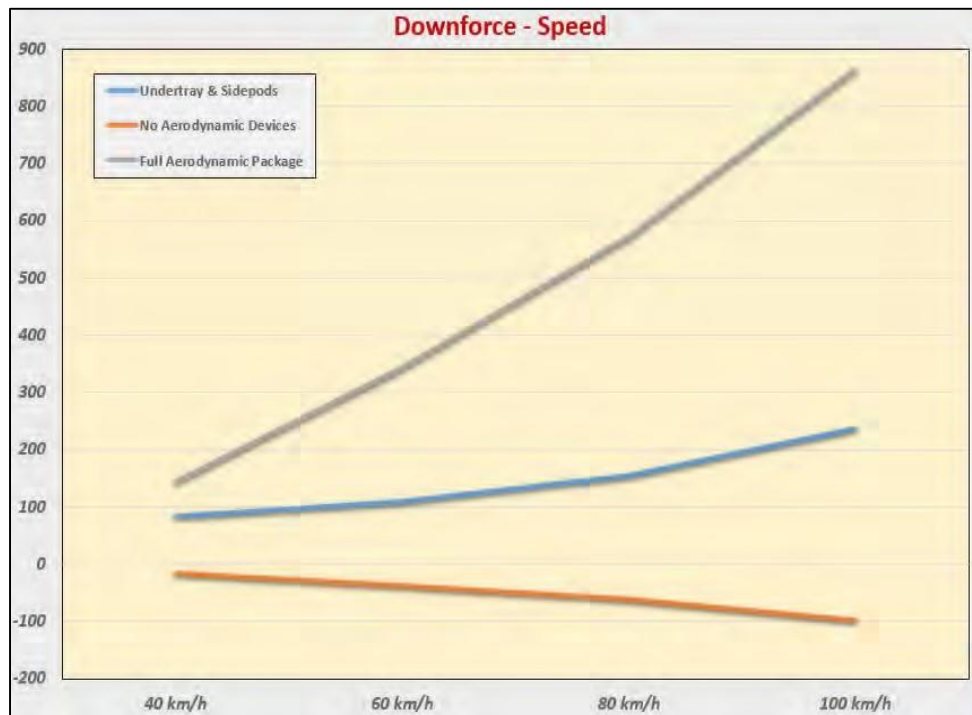


Рисунок 51 – Диаграмма появления прижимной силы в каждом случае для скоростей от 40 до 100 км/ч

Хотя модель с полным аэродинамическим пакетом создает наибольшую прижимную силу на всех скоростях, ожидается, что эта модель также будет производить большее лобовое сопротивление. На приведенной ниже диаграмме показаны данные по силе лобового сопротивления каждой модели для скоростей от 40 до 100 км/ч. Обе модели автомобиля без каких-либо аэродинамических устройств и с днищем имеют одинаковую тенденцию к постепенному увеличению, начиная с силы сопротивления менее 50 Н на скорости 40 км/ч и достигая пикового значения 140 Н для первой модели и значения 180 Н для модели с днищем [26]. С другой стороны, модель с полным аэродинамическим пакетом создает значительно более высокое сопротивление на всех скоростях, поскольку оно начинается с сопротивления, близкого к предыдущим моделям, на уровне 60 Н, а затем быстро увеличивается и достигает своего пика в 375 Н для конечной скорости автомобиля на скорости 100 км/ч.

Создаваемое сопротивление полной аэродинамической модели примерно вдвое больше, чем у остальных моделей, однако это происходит только для скоростей более 80 км/ч и является приемлемой ситуацией, так как при средней скорости автомобиля 60 км/ч величина сопротивления настолько выше, насколько это ожидалось в соответствии с генерируемой прижимной силой, о которой говорилось ранее. На рисунке 52 представлен график возникновения лобового сопротивления каждой из моделей.



Рисунок 52 – График возникновения лобового сопротивления в каждом случае для скоростей от 40 до 100 км/ч

#### Выводы по разделу

Проведя анализ полученных данных, могу полагать что исследование влияния аэродинамических элементов успешно завершены, и можно переходить к заключению о проделанной работе.

## Заключение

В проведенной выше работе, было доказано и полностью рассчитано влияние аэродинамических элементов на прижимную силу и ходовые характеристики автомобиля.

Проектирование аэродинамических элементов гоночного болида, в первую очередь очень затяжной и трудоёмкий процесс, который требует не только большой теоретической подготовки, но и успешного применения полученных теоретических навыков.

При углубленном анализе полученных нами данных были выявлены сразу несколько различных тонкостей конструкции. Важно всегда правильно коррелировать углы установки аэродинамических элементов, ведь неосторожное выставление таковых, оказывает влияние на все характеристики гоночного болида незамедлительно, также в условиях расчётов, для более высокой точности их, необходимо произвести чистку изначальной CAD-модели чтобы избежать ненужных дефектов при производстве расчетов.

При расчёте разных компоновок аэродинамического обвеса болида класса «Формула» были выявлены результаты, которые показывают нам практическую значимость применения полного аэродинамического обвеса на болиде.

«Формула студент» является не только соревнованием про гонки болидов, но и в первую очередь соревнованиями инженеров, для поиска наиболее свежих подходов к проектированию и конструированию гоночных болидов.

Все цели и задачи, поставленные перед работой, были успешно выполнены, полноценное влияние доказано, и произведены все необходимые для этого расчеты, подведены итоги и выстроена целостная конструкция нового болида.

Аэродинамика в построении гоночного болида класса «Формула» является одной из самых трудных и самых противоречивых частей из

постройки автомобиля. Именно поэтому грамотные специалисты по аэродинамике очень ценятся не только в спортивных студенческих командах, но и во всех спортивных видах соревнований по автоспорту.

Более того, каждый, кто смог овладеть хотя бы частью из мной вышеописанного записал на свой счёт очень весомый вклад в свою будущую карьеру.

«Формула студент» это не только хобби, это своего рода призвание, которое двигает каждого из тех, кто занимается этим, неуклонно вперед, открывает новые горизонты для развития, как творческого, так и профессионального.

## Список используемых источников

1. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. - 8-е изд. Перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестоковой. [Текст] / В.И. Анурьев. - М.: Машиностроение, 2001 . - 864 с.
2. Аэродинамика автомобиля / Под редакцией В.-Г. Гухо. Машиностроение, 1986.
3. Вишняков, Н.Н. Автомобиль: Основы конструкции 2 изд-е [Текст] / Вишняков Н.Н, Вахламов В.К, Нарбут А.Н. – М. :Машиностроение, 1986. – 304 с
4. Волкова, Е.И., Шерстобитова О.О. «Разработка пространственной рамы для гоночного болида Black Bullet» / VII выпуск журнала "Точная наука".-2017.-18-20 с.
5. Волкова, Е.И., Двоеглазова, Н.А. «Методика расчёта бизнес-презентации в рамках проекта Formula Student» / Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты".-2017. – 198-204с.
6. Гаспарянц, Г. А. Конструкция, основы теории и расчета автомобиля [Текст] / Г.А. Гаспарянц. – М. :Машиностроение, 1978. – 351 с
7. Горбачевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для вузов/ А.Ф. Горбачевич, В.А. Шкред. М: – ООО ИД «Альянс», 2007 – 256 с.
8. Дэс Хаммилл. Аэродинамика: как построить и модифицировать спортивный автомобиль / Пер. с англ. – М: Легион-Автодата, 2005, – 96с.
9. Иванов, А.С. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие / А.С. Иванов, П.А. Давыденко, Н.П. Шамов. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 276 с.
10. Косов, Н.П. Технологическая оснастка: вопросы и ответы: Учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / Н.П. Косов, А.Н. Исаев, А.Г. Схиртладзе. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 304 с

11. Кузнецов, Б.А Краткий автомобильный справочник. – 10-е изд [Текст] / Б.А. Кузнецов. – М. : Транспорт, 1984. – 220 с
12. Лебедев, В. А. Технология машиностроения: Проектирование технологий изготовления изделий: учеб. пособие для вузов / В. А. Лебедев, М. А. Тамаркин, Д. П. Гепта. - Гриф УМО. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 361с.
13. Сайт Formula SAE [Электронный ресурс]// URL:<http://www.fsaeonline.com/>
14. Сайт Formula SAE [Электронный ресурс]// URL:<http://students.sae.org/cds/formulaseries/>
15. Сайт FSG [Электронный ресурс] // URL:<https://www.formulastudent.de/>
16. Сергель, Н.Н. Технологическое оборудование машиностроительных предприятий [Электронный ресурс]: учеб.пособие / Н. Н. Сергель. - Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2013. - 732 с
17. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 (Под ред. А.Г. Косиловой 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985, 496 с., ил.).
18. Суслов, А. Г. Технология машиностроения: учеб.для вузов / А. Г. Суслов. - 2-е изд., перераб. и доп.; Гриф МО. - Москва: Машиностроение, 2007. - 429 с.
19. 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. – 205-207 с
20. Anshul Singhal, Mallika Parveen, Member, IAENG Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol III, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K.[http://www.iaeng.org/publication/WCE2013/WCE2013\\_pp1847-1851.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2013/WCE2013_pp1847-1851.pdf).
21. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Intake\\_exhaust.html](http://www.autozine.org/technical_school/engine/Intake_exhaust.html).

22. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_2.htm#Cam-changing](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_2.htm#Cam-changing).
23. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_3.htm](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_3.htm).
24. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_31.htm](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_31.htm).
25. Buchman, Michael R., Amos G. Winter Method for Turbocharging Single Cylinder Four Stroke Engines [текст] //16th International Conference on Advanced Vehicle Technologies; 11th International Conference on Design Education; 7th Frontiers in Biomedical Devices.
26. Development of a Power-train for a Formula SAE Competition Vehicle [Электронный ресурс] <http://papers.sae.org/2010-32-0085/>.
27. Giovanni Vichi, Luca Romani, Lorenzo Ferrari, Giovanni Ferrara Development of an engine variable geometry intake system for a Formula SAE application [текст] // 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2014.
28. Jenny E. Die Verwertung der Abgasenergie beim aufgeladenen Viertaktmotor. – The brown bavery Review, 1950, № 11, p. 447 – 461 6.
29. Julian Wisnu Wirawan, Ubaidillah, Rama Aditra, Rafli Alnursyah, Rizki Abdul Rahman, and Sukmaji Indro Cahyono. Design Analysis of Formula Student Race Car Suspension System// AIP Conference Proceedings 1931, 030051 (2018)URL:[https://www.researchgate.net/publication/323082348\\_Design\\_analysis\\_of\\_formula\\_student\\_race\\_car\\_suspension\\_system](https://www.researchgate.net/publication/323082348_Design_analysis_of_formula_student_race_car_suspension_system)
30. ØYVIND GUNDERSEN Free Valve Technology[текст] // Master of Science Thesis Stockholm, Sweden 2009.
31. Pat Clarke, "Technical Introduction for New Teams", 2014
32. Roner, Nathan, "Optimum Suspension Geometry for a Formula SAE Car" (2018). University Honors Theses. Paper 537. URL1: <https://pdxscholar.library.pdx.edu/honorsthesis/537/> URL2:



<https://pdfs.semanticscholar.org/37c7/635a28bfaadbfd4354266a1667b2db3cd74c.pdf>

33. Sadjyot Biswal , Aravind Prasanth, Dr. R Udayakumar, Shobhit Deva, Aman Gupta. Design of a suspension system and determining suspension parameters of a medium downforce small Formula type car.// MATEC Web of Conferences 124, 07006(2017)URL:[https://www.researchgate.net/publication/320104741\\_Design\\_of\\_a\\_suspension\\_system\\_and\\_determining\\_suspension\\_parameters\\_of\\_a\\_medium\\_downforce\\_small\\_Formula\\_type\\_car](https://www.researchgate.net/publication/320104741_Design_of_a_suspension_system_and_determining_suspension_parameters_of_a_medium_downforce_small_Formula_type_car)

34. Sulaiman S. A., Murad S. H. M., Ibrahim I. and Abdul Karim Z. A. Study of flow in air-intake system for a single-cylinder go-kart engine [электронный ресурс]/ S. A. Sulaiman and the others // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME). -ISSN: 2180-1606 (Online). - Volume1. pp.91 104. URL: [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume\\_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf).

35. Variable-length intake manifold [электронный ресурс]: URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-length\\_intake\\_manifold#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-length_intake_manifold#cite_note-1).