

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 параметров шин на маневренность болида
класса «Formula Student» при прохождении трасс различных конфигураций»

Обучающийся	Л.С. Харин	
	(Инициалы Фамилия)	(личная подпись)
Научный руководитель	канд. техн. наук, А.В. Зотов	
	(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	
Консультант	канд. филол. наук, М.М. Бажутина	
	(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	

Тольятти 2023

Содержание

Введение	3
1 Состояние вопроса	5
1.1 Требования к шинам в проекте «Формула Студент» согласно действующему регламенту	5
1.2 Сравнительный анализ шин команд проекта «Формула Студент»	6
1.3 Факторы при подборе шин в проекте «Формула Студент»	10
2 Теоретические основы воздействия внешних и внутренних сил на шину автомобиля в движении	16
2.1 Анализ сил, возникающих в пятне контакта шин с дорогой, при совершении автомобилем манёвра.....	16
2.2 Анализ влияния коэффициента сцепления и его составляющих на поведение автомобиля при маневре.....	33
3 Экспериментальные и аналитические исследования	40
3.1 Расчет сцепных характеристик шин экспериментальным методом	40
3.2 Тягово-динамические параметры автомобиля.....	43
3.3 Подготовка аналитических данных для математического анализа на основе тягово-динамического расчета	45
4 Моделирование движения автомобиля по кругу.....	51
4.1 Основные параметров для математического моделирования.....	51
4.2 Анализ данных моделирования при движении автомобиля по кругу с изменяемыми параметрами шины.....	61
Заключение	73
Список используемой литературы и используемых источников	74

Введение

Для студентов по всему миру важно найти возможность получить актуальные знания в востребованных профессиях. Одной из таких профессий, в момент технологических инноваций, является автомобилестроение. Но для получения достойных кадров и дальнейшего прогресса в сфере развития отрасли требуются улучшенные учебные программы. Эффективным способом приобретения знаний считается параллельное получение технических и теоретических знаний. Для такой цели, как улучшение качества подготовки студентов, был создан проект «Формула Студент».

Начиная с 1981 года, соревнования по данной тематике проводятся ежегодно. Цель соревнований – проверить как студенты под единый регламент, который ежегодно меняется, применяют разные, по-своему уникальные технические решения.

Помимо динамических дисциплин таких как: «Skidpad», «Acceleration», «Autocross», «Endurance» на треке, есть и статические дисциплины. В них рассматривается не скорость прохождения участков трассы и умение управлять автомобилем, а грамотность применения теоретических знаний и правильность подхода при расчете узлов автомобиля.

При прохождении «Защиты конструкции» (англ. Design Report) студенту могут задавать различные вопросы по тематике постройки и проектирования гоночного болида, на которые он должен знать ответ. Эти вопросы затрагивают фундамент знаний студента, на которые он опирался во время расчетов и проектирования автомобиля. Данная процедура полезна тем, что во время защиты студент получает опыт представления своих решений, общения с судьями мирового уровня, которые укажут, на что необходимо обратить внимание в следующий раз при проектировании и помогут в работе над своими ошибками, что в дальнейшем приведет к формированию необходимых навыков.

Одной из таких тем является выбор колес для гоночного болида. Это немаловажный элемент автомобиля, который всегда вызывает у судей соревнований определенные вопросы – а именно на что студент делал упор при выборе марки, состава резиносмеси и размерности шины.

Действительно, у судей может возникать некоторое количество вопросов, поскольку шины оказывают огромное влияние на большинство эксплуатационных свойств автомобиля. Чтобы в машине было безопасно во время движения, необходимо, чтобы шины обеспечивали хорошее сцепление с дорогой. Тягово-скоростные характеристики, профильная и опорная проходимость, устойчивость и управляемость также определяются свойствами шин. Помимо этого, шины имеют влияние на комфортабельность и плавность хода автомобиля, а также на его топливную экономичность.

Цель данной работы: рассмотреть, какие существуют параметры шины; проанализировать, как они влияют на управляемость и маневренность; рассчитать коэффициенты шин болида «Формула Студент» с учетом характеристик нескольких типов шин; провести симуляции движения автомобиля по кругу с полученными параметрами по шинам и сделать анализ влияния на управляемость по полученным данным.

Задачи работы:

- 1) рассмотреть типы шин для болидов и требования к ним;
- 2) выявить виды сил, возникающих в шине при движении по дороге;
- 3) произвести расчет по данным шины, получить коэффициенты и применить их при симуляции движения автомобиля по кругу;
- 4) получить данные, необходимые для моделирования движения автомобиля по кругу;
- 5) провести ряд симуляций для сравнения данных по шинам при движении автомобиля по трассе;
- 6) применить полученные сведения для улучшения показателей болида «Формула Студент».

1 Состояние вопроса

1.1 Требования к шинам в проекте «Формула Студент» согласно действующему регламенту

Для участия в соревнованиях «Формула Студент», как и при постройке гражданского автомобиля, есть определенный свод правил – так называемый регламент проекта. При проектировании автомобиля студенты опираются на требования и правила регламента. Сам регламент был разработан немецкими судьями FS Germany в целях безопасности и правильности разработки болида с соблюдением технических требований.

В регламенте есть и отдельная часть, затрагивающая непосредственно шины – какими они должны быть и что запрещается с ними делать. [15,16]

Ниже перечислены соответствующие пункты регламента.

T 2.5.1 Автомобили должны иметь два комплекта шин:

- шины для сухой погоды – шины, установленные на автомобиле во время технической инспекции, считаются шинами для сухой погоды;
- шины для влажной погоды – шины для влажной погоды могут быть любого размера и иметь любой тип протектора шины;
- рисунок протектора или канавки должны быть подвергнуты формовке только изготовителем шин или быть прорезаны только изготовителем шины или его назначенным агентом. Все прорезанные канавки должны иметь документальное подтверждение того, что это было сделано в соответствии с этими правилами;
- минимальная глубина рисунка протектора – 2,4 мм.

T 2.5.2 Шины на одной оси должны быть от одного производителя, иметь один размер и материал.

T 2.5.3 Подогреватели шин запрещены.

T 2.5.4 Использование тяговых усилителей запрещено.[17,18]

1.2 Сравнительный анализ шин команд проекта «Формула Студент»

Для качественного результата, команды проекта «Формула Студент» акцентируют внимание не только на расчете рамы, отдельных узлов и агрегатов. Самый оптимальный и каноничный расчет автомобиля начинается с выбора входных данных, где основу составляют характеристики, которые хотят получить от своего будущего болида.

Одним из пунктов, на что обращают внимание при проектировании нового болида – это характеристики шины. Эти данные студенты могут получить только двумя путями:

- покупка данных по характеристикам шин у испытательной лаборатории (завода-изготовителя);
- проводить самостоятельные расчеты и испытания в лабораториях института на выверенном оборудовании.

В мире мало компаний, которые делают специализированные шины под проект «Формула Студент», и выбор не так велик, если обратить внимание на то, какие шины используют команды для своих гоночных болидов.

Основным поставщиком шин является компания «Hoosier». Компания является лидером номер один с 1985 года по поставкам шин для гоночных автомобилей. Но также, встречаются и другие бренды, такие как, например, «Continental». [25,26]

В выборе играет роль не только производитель, но и бюджет команд. При малом бюджете, приходится экономить и выбирать резину от малоизвестных брендов, иногда даже простые гражданские шины с мало выдающимися характеристиками, в отличие от представленных выше брендов.

Рассмотрим примеры, где наглядно видно какого производителя шин выбирают студенты проекта «Формула Студент» (рисунки 1–4).

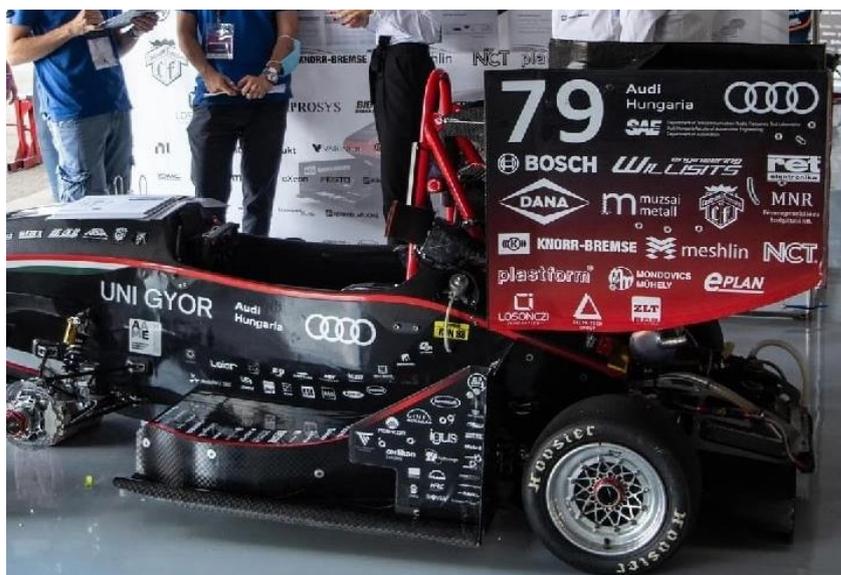


Рисунок 1 – Шины «Hoosier» команды Arrabona Racing Team

Из рисунка 1 видно, что команда использует шины с посадочным диаметром 10 дюймов и внешним 16 дюймов. Такая размерность шин характерна для автомобилей с грамотно спроектированной подвеской и малым весом. [7,13]



Рисунок 2 – Шины «Hoosier» команды FS USURT

На рисунке 2 уже можно увидеть проект российской команды, которая так же использует шины производителя «Hoosier». Посадочный диаметр здесь 10 дюймов, а вот внешний уже 18 дюймов.

Такой внешний диаметр дает преимущество по клиренсу автомобиля, который не должен быть меньше 30 мм вместе с пилотом – это одно из обязательных правил регламента.



Рисунок 3 – Шины «Hoosier» команды WANE STATE F SAE

Показанная на рисунке 3 команда использует аналогичные шины, как и Российская команда FS USURT. Такой выбор можно обосновать тем, что в Европе трассы имеют скоростную конфигурацию с длинными прямыми участками, а выбранная размерность поможет достичь большей максимальной скорости при их прохождении. [1]



Рисунок 4 – Шины «Continental» команды FORMULA OSTROVA

У команды FORMULA OSTROVA (рисунок 4) шины отличаются по всем параметрам. Посадочный диаметр здесь 13 дюймов – это говорит о том, что для того, чтобы снизить массу нужно подбирать дорогостоящие диски, которые смогут уменьшить массу болида. Внешний диаметр 18 дюймов и малый профиль гарантируют жесткую работу подвески и минимальный угол увода шины, если шины имеют жесткую резиносмесь. Но данное решение положительно играет при компоновке передних-задних кулаков и тормозных суппортов.

1.3 Факторы при подборе шин в проекте «Формула Студент»

Начать можно с того, что выбор шин трудоемкий процесс, ведь от выбора напрямую зависит результат автомобиля на гоночном треке.

Студенты подбирают на свои болиды гоночные шины именитых брендов, и неспроста. Гоночные шины отличаются от гражданских – обеспечивают автомобиль максимальным коэффициентом сцепления при высоких скоростях, повышенной безопасностью и различием, как конструкции самой шины, так и рисунка её протектора, состава и мягкости.

Существуют два вида шин для гоночных автомобилей, предназначенных для езды по сухим дорожным покрытиям: слик и полуслик.

Слик, представленный на рисунке 5, самый распространённый тип гоночных шин.



Рисунок 5 – Шина типа «Слик»

Протектор данных шин дает максимальное пятно контакта с дорогой и, благодаря этому, максимальное сцепление с дорожным покрытием.

Используется представленная шина только на специальных гоночных треках с почти идеальным покрытием, что возможно и позволяет им иметь довольно продолжительный срок службы. Как правило, в профессиональных

гонках таких как «Formula 1» шины используются в заездах всего половину гонки, далее они применяются только для тренировок.

Слики могут иметь несколько вариантов жесткости и резиносмеси. Пилот учитывает состояние дорожного полотна, условия при которых будет проходить заезд и самостоятельно выбирает на каких шинах ему лучше выступать.

Полуслики (рисунок 6) в отличие от сликов нашли применение в более широком гоночном спектре.



Рисунок 6 – Шина типа «Полуслик»

Их применяют для участия, как на горных гоночных чемпионатах, так и в любительском ралли. Также их можно встретить и на дорогах общего пользования, но полуслики полностью свой потенциал показывают только на сухом покрытии и подготовленных трассах.

У полусликов также есть возможность подбирать жесткость резиносмеси. К примеру, для горных заездов подбирается «мягкая» резина, для лучшего сцепления на неровной дороге, а в гонках на асфальтовом покрытии предпочитают среднюю жесткость с минимальной степенью износа и выносливостью для продолжительной гонки.

Для правильного поведения на дороге и для минимального износа нужно учитывать несколько факторов:

- давление в шинах;
- жесткость резины;
- состояние дороги;
- стиль вождения;
- температура воздуха;
- мощность автомобиля.

Но езда по мокрому асфальту крайне нежелательна. На протекторе шины мало водоотводящих канавок, что увеличивает риск аквапланирования.

Есть также тип спортивных шин «Extreme Performance» (рисунок 7).



Рисунок 7 – Шина типа «Extreme Performance»

Данные покрышки подходят для езды как на гоночной трассе, так и по гражданским дорогам.

Шины гоночных автомобилей имеют повышенные требования: резина должна обладать хорошей адгезией на любой поверхности дороги и позволять автомобилю удерживать скорость в поворотах без потери подъемной силы. Также шина должна иметь высокую устойчивость к износу,

так как гоночные автомобили проходят множество кругов на высокой скорости. [24]

«Наиболее высоким нагрузкам подвергаются шины рекордно-гоночных автомобилей, предназначенных для установления абсолютных мировых рекордов скорости. Так, например, при радиусе качения 550 мм и скорости 140 м/сек (504 км/час) только под влиянием центробежной силы каждый грамм веса протектора на окружности колеса нагружен силой 4 кг, то есть в 4000 раз больше собственного веса. При скорости 500 км/час деформация от неровностей дороги больше в 125 раз по сравнению с деформацией при скорости в 100 км/час.

Даже для дорожно-гоночных автомобилей при скоростях от 200 до 220 км/час и шинах с радиусом качения от 330 до 350 мм протектор при движении нагружается центробежной силой примерно в 1000 раз больше его веса.

Поэтому покрышки шин гоночных автомобилей изготавливают из высокопрочных материалов. Для корда используют натуральный или искусственный шелк, а, в последнее время, ткань типа «Капрон». Каркас выполняют из стальной проволоки с очень высоким сопротивлением разрыву. Для протектора применяют лучшие сорта натурального каучука.

Износостойкость шин должна обеспечивать пробег в пределах дистанции рекордного заезда, если, конечно, этот рекорд не устанавливается на очень дальние дистанции (свыше 1000 км)» [2].

«Для дорожно-гоночных автомобилей желательно, чтобы стойкость шин обеспечивала их несменяемость на всю дистанцию длительных соревнований.

Характеристики шин сильно влияют на управляемость автомобиля. Особенно от них зависят углы увода. Для достижения хорошей управляемости, необходимо максимально реализовать способность шин воспринимать боковые и продольные силы, возникающие при движении

автомобиля, а для этого необходимо должным образом настроить подвеску и системы управления» [10].

Конструкция шины оказывает существенное влияние на ее характеристики и свойства, например:

- рисунок протектора – влияет на сцепление шины с дорожным покрытием и ее устойчивость на поворотах;
- размеры шины – определяются ее конструкцией и могут влиять на управляемость автомобиля и его устойчивость при движении на больших скоростях;
- количество слоев каркаса – определяет прочность шины и ее способность справляться с повреждениями на дороге;
- наличие контурной надписи (окантовки) – повышает жесткость боковой стенки шины, что уменьшает риск порезов и повреждений;
- материалы, из которых изготовлены шина и ее компоненты (резиновая смесь, текстильные или металлические шины) – влияют на их прочность, износостойкость и сцепление с дорогой.

«Радиальные шины хорошо сопротивляются уводу автомобиля и имеют больший коэффициент сопротивления уводу, чем диагональные шины, но более подвержены срыву при достижении максимального угла увода. Изношенные покрышки также имеют больший коэффициент сопротивления уводу, по сравнению с покрышками с полным рисунком протектора. Пути релаксации радиальных шин имеют большие значения, чем у диагональных шин» [10].

Низкое давление воздуха в шинах может ухудшить управляемость автомобиля, поскольку шина становится более мягкой и менее точной в поворотах. Высокое давление воздуха также может ухудшить управляемость, поскольку шина становится более жесткой и менее гибкой, что может привести к перепрыгиванию автомобиля на дороге при движении по неровностям. [3,4,31]

В. Н. Лата пишет: «Упругая податливость шин в боковом направлении приводит к увеличению стабилизирующего момента в рулевом управлении при действии на передних управляемых колёсах тяговых сил. Возникающий вследствие этого дополнительный упругий поворот колёс меняет поворачиваемость в сторону недостаточной» [8].

В качестве вывода по разделу можно заключить, что тенденции в выборе шин для проекта «Формула Студент» давно устоялись. В основном это слик «Hoosier», в другом – слик или полуслик «Continental».

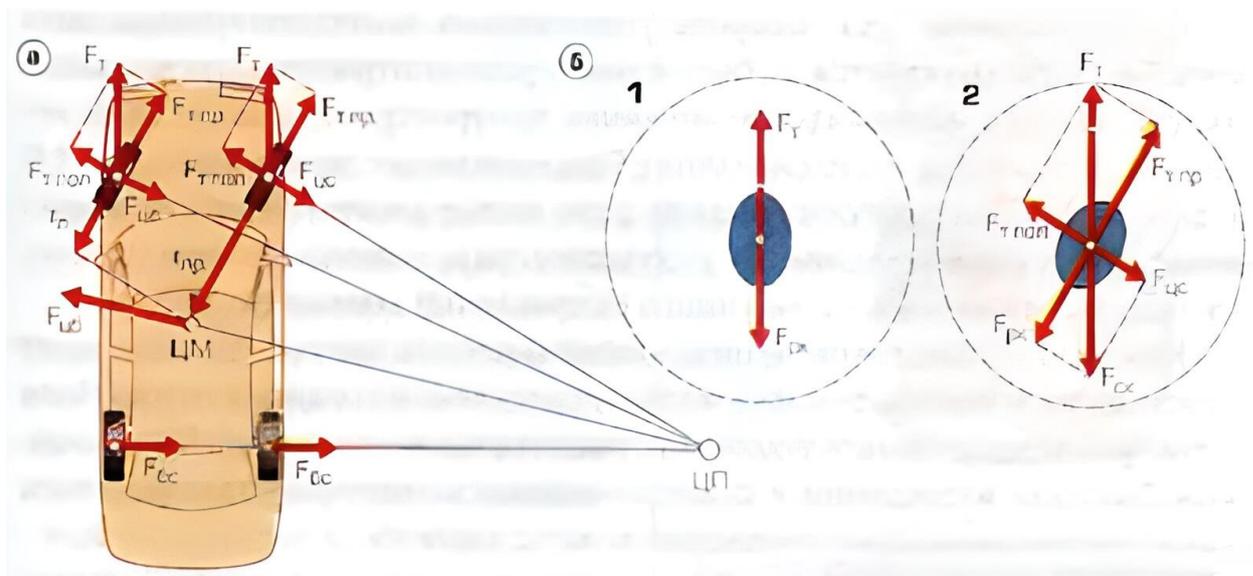
Те команды, которые имеют достаточный бюджет, покупают шины именитых брендов по разным причинам – кто-то аргументирует это тем, что «другие берут, и мы возьмем», а кто-то производит объемные расчеты по подбору шин, их состава, жесткости и характеристик дорожного полотна гоночного трека. Но какой бы выбор команда не сделала, на защите конструкции его придется обосновать и предоставить данные от чего отталкивались и с чем сравнивали.

2 Теоретические основы воздействия внешних и внутренних сил на шину автомобиля в движении

2.1 Анализ сил, возникающих в пятне контакта шин с дорогой, при совершении автомобилем манёвра

Из первого раздела мы уже понимаем, какие есть типы шин, какие физические характеристики они имеют и на что могут повлиять, но до конца не разобрались, что происходит в пятне контакта автомобиля с дорогой.

Наглядно рассмотреть какие силы возникают в пятне контакта и автомобиле во время движения при смене его направления можно на рисунке 8.



F_T – сила тяги; $F_{бс}$ – сила бокового сцепления; $F_{цс}$ – центробежная сила; $r_л$ – левое плечо; $r_п$ – правое плечо; ЦМ – центр масс; ЦП – центр поворота; $F_{ск}$ – сила сопротивления качению; $F_{рк}$ – сила трения подшипников колеса и кинематически связанных с ним механизмов; $F_{т пр}$ ($F_{т поп}$) – продольная (поперечная) составляющая силы тяги.

Рисунок 8 – Силы: а – действующие на автомобиль; б – на управляемое колесо в пятне его контакта с дорогой

Но для начала разберемся, что такое пятно контакта. Пятно контакта – это площадь, на которой шина контактирует с дорогой. Шины должны иметь определенную площадь контакта, чтобы обеспечивать необходимую устойчивость и сцепление с дорогой. Площадь контакта зависит от нескольких факторов, включая размер шины, давление воздуха в ней, тип протектора, состояние дороги и скорость, с которой автомобиль движется. Когда автомобиль находится на неподвижной дороге, площадь контакта шины с поверхностью достигает максимального значения. Когда автомобиль движется по дороге, пятно контакта уменьшается и снова увеличивается при поворотах.

Различают контурную площадь (рисунок 9а) и площадь контакта по выступам рисунка протектора (рисунок 9б) с опорной поверхностью.

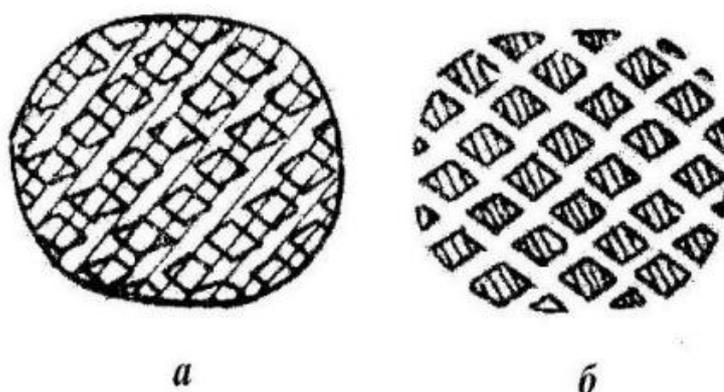


Рисунок 9 – Площадь пятна контакта шины: а – контурная; б – по выступам рисунка протектора

При высоких скоростях, когда давление воздуха в шинах должно быть выше, пятно контакта уменьшается. Если давление воздуха в шинах ниже рекомендованного, то площадь контакта увеличивается, что может повлиять на управляемость автомобиля и уменьшить сцепление шин с дорогой, особенно на мокрой поверхности.

«Площадь пятна контакта при движении может быть даже больше площади пятна контакта при статической нагрузке. Вертикальная нагрузка

зависит от переноса центра масс автомобиля, например, при разгоне и торможении, а также от прижимающего воздействия аэродинамики. Высокая вертикальная нагрузка и большая площадь пятна контакта обеспечивают наибольшее сцепление автомобиля с дорожным покрытием, из чего следует, что в свою очередь создаёт давление колеса на дорогу» [11].

«Давайте вернемся к рисунку 8, где мы можем рассмотреть случай заднеприводного автомобиля. В этом случае на неведущее колесо действует только толкающая сила тяги F_T , направленная к оси колеса и вращающая его. При этом силы трения подшипников колеса и кинематически связанных с ним механизмов препятствуют его вращению, что создает дополнительную силу $F_{рк}$, расположенную в плоскости вращения колеса и имеющую наименьшее значение в положении колес «прямо».

При повороте колес на некоторый угол мы можем разложить толкающую силу F_T по составляющим: $F_{T,пр.}$, направленной в плоскости повернутого колеса, и $F_{T,поп.}$, перпендикулярной ей. Обе эти силы стремятся вызвать перемещение колес в соответствующих направлениях. Для того чтобы колесо катилось в плоскости своего вращения, сила $F_{T,пр.}$ должна быть больше силы сопротивления качению колеса в плоскости его вращения $F_{рк}$, а сила $F_{T,поп.}$ должна оставаться меньше силы сцепления колеса с дорогой, чтобы колесо не начало скользить вбок.

В отличие от управляемых колес, при повороте неведущих колес не возникает роста силы $F_{рк}$. Однако общая сила сопротивления качению $F_{ск}$ возрастает, особенно при крутом повороте. Этот рост обусловлен появлением центростремительной силы $F_{цс}$. Она является боковой реакцией на силу $F_{T,поп.}$ и отклоняет повернутые колеса от прямолинейного движения, заставляя автомобиль поворачивать.

Центростремительная сила $F_{цс}$ может вызвать поперечное скольжение или опрокидывание автомобиля при крене в сторону, противоположную повороту, то есть к наружному закруглению дороги. Важно учитывать эту

силу при проектировании подвески и шин автомобиля, а также при выборе правильной скорости поворота на дороге» [11].

Это происходит под действием на него центробежной силы:

$$F_{\text{ЦБ}} = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (1)$$

где m – масса автомобиля;

v – скорость автомобиля;

R – радиус поворота.

При увеличении угла поворота управляемых колес, возрастает поперечная сила тяги $F_{\text{т.поп.}}$, что ведет к возрастанию центростремительной силы $F_{\text{цс}}$. Хотя стоит отметить, что существует максимальное значение центростремительной силы, определяемое силой бокового сцепления $P_{\text{бок.сц.}}$ колес с дорогой. Как только центростремительная сила достигает этого предела, управляемые колеса начинают скользить в сторону, отклоняясь от движения.

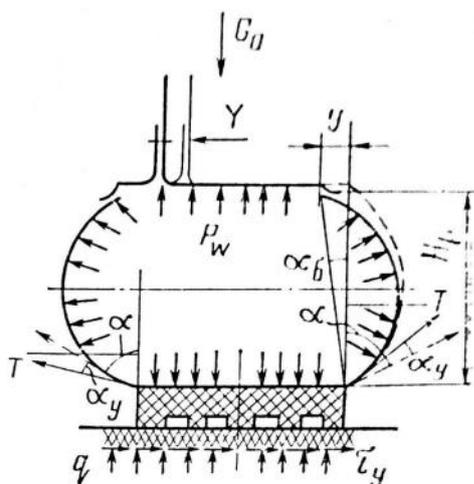
Поэтому практический опыт помогает водителям интуитивно понимать соотношение между скоростью въезда автомобиля в поворот и максимальным допустимым углом поворота управляемых колес. Если автомобиль въезжает в поворот слишком быстро, может возникнуть потеря управляемости, из-за превышения силы сцепления колес с дорогой.

Изображение (рисунок 8а) демонстрирует, что одинаковые по величине центростремительные силы $F_{\text{цс}}$, направленные в разные стороны, на управляемые колеса создают разные моменты относительно центра масс автомобиля за счет разных расстояний до него ($r_{\text{л}}$ – расстояние до левого колеса, $r_{\text{пр}}$ – расстояние до правого колеса). Общий момент стремится повернуть автомобиль вокруг своей вертикальной оси. Однако этого не произойдет, пока момент крутящего момента от сил $F_{\text{цс}}$ не сбалансирован

моментом сил F_{6c} (бокового сцепления задних колес). Если это препятствие нарушается, задняя ось начинает дергаться в сторону заноса.

«На практике автомобиль почти всегда подвержен воздействию боковых сил, таких как силы ветра, возникающие при движении на крутом склоне, силы, вызванные наездом на неровности дороги, центробежная сила при повороте, инерционные силы и силы, возникающие из-за разности продольных реакций на колесах правой и левой стороны автомобиля, которые создают поворачивающий момент.

На работу шины, управляемость и устойчивость автомобиля большое влияние оказывает податливость шины в боковом направлении. Боковое деформирование шины представляет собой довольно сложный процесс, представленный на рисунке 10» [8].



T – сила натяжения нити корда; α_b – угол смещения обода; y – боковое смещение обода.

Рисунок 10 – Поперечное сечение шины при наличии нормальной и боковой силы

«При воздействии боковой силы F_y поперечный профиль шины перекашивается и становится несимметричным относительно вертикальной плоскости, проходящей через центр пятна контакта и перпендикулярной оси колеса. Проекция натяжения в нитях левой и правой стенок шины на

горизонтальную плоскость в результате такого перекоса становятся неравными друг другу. Поэтому, боковая сила уравнивается разностью проекций натяжений T на горизонтальную ось, то есть:

$$F_y = T \sin(\alpha + \alpha_y) - T \sin(\alpha - \alpha_y), \quad (2)$$

учитывая, что

$$\alpha_y = \frac{y}{H} \quad (3)$$

где H – высота профиля;

$$T = p_w r, \quad (4)$$

где p_w – давление воздуха в шине;

r – радиус колеса.

Получим

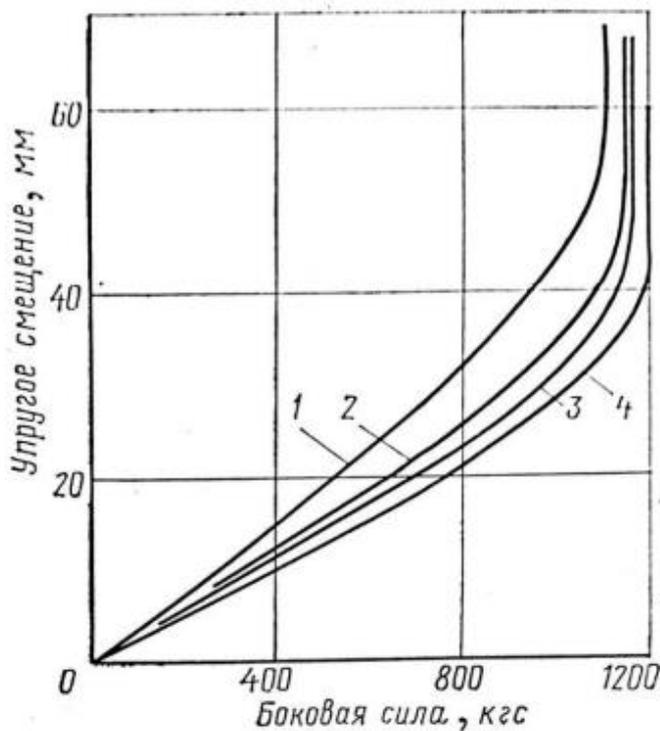
$$F_y = 2p_w \frac{y}{H} r \cos \alpha \quad (5)$$

В. И. Кнороз пишет: «Хотя в данное выражение давления воздуха p_w входит в явном виде, однако, его влияние на боковую жёсткость шины сказывается в меньшей степени, чем на нормальную жёсткость. Это связано с тем, что при увеличении p_w уменьшается длина контакта шины, а следовательно, и пределы интегрирования при расчёте суммарной величины боковой нагрузки, действующей на колесо» [15].

Из опытов было выявлено, что увеличение давления в шинах может привести к снижению боковой жесткости. Это связано с тем, что сокращение длины контакта влияет на шину сильнее, чем натяжение нитей ее каркаса.

Характеристика боковой жесткости шины отражена на рисунке 11, где показана зависимость бокового смещения колеса от боковой силы. Эта

зависимость описывается линейной функцией до момента проскальзывания, что позволяет вычислить боковую жесткость колеса, величина которой практически не зависит от бокового смещения.



1 – $p_w = 3,5 \text{ кгс/см}^2$; 2 – $p_w = 4,5 \text{ кгс/см}^2$;
 3 – $p_w = 5,0 \text{ кгс/см}^2$; 4 – $p_w = 6,0 \text{ кгс/см}^2$.

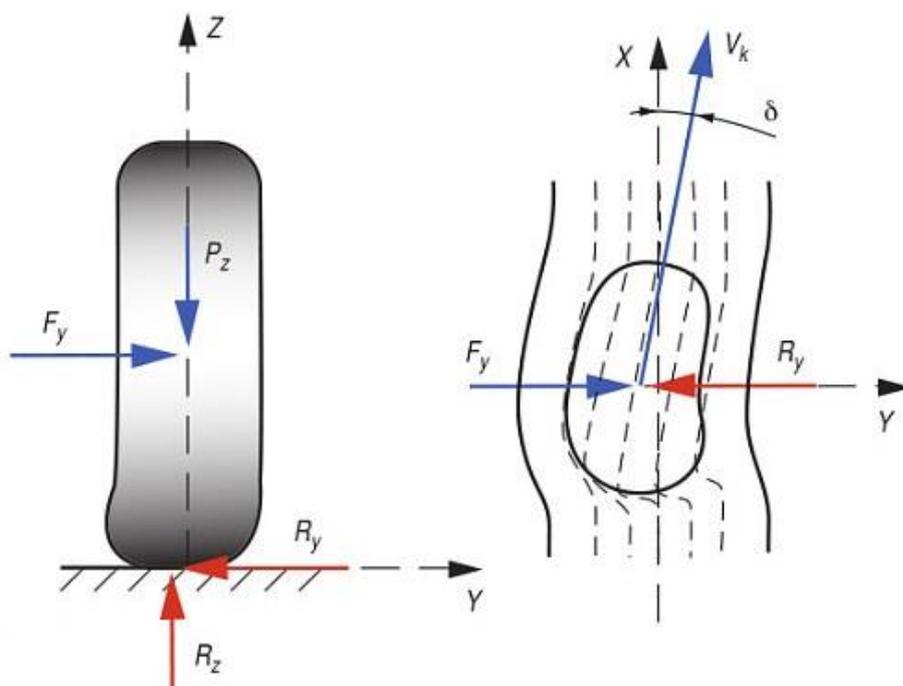
Рисунок 11 – Зависимость бокового упругого смещения колеса от боковой силы при нагрузке 2300 кгс и различных значениях давления

Существует еще одно понятие, связанное с воздействием на шину поперечной силы, называемое «боковой увод».

Данный эффект возникает при повороте автомобиля, когда инерция генерирует центробежную силу, которая выталкивает автомобиль из поворота. Эта сила передается на шины, вызывая на них боковое отклонение, что можно увидеть на рисунке 12.

Боковой увод важен, поскольку определяет способность колеса воспринимать боковую нагрузку, которая появляется, когда колесо катится

под углом к направлению движения. Благодаря эластичности шины, точки в пятне контакта также имеют боковое отклонение.



R_y – боковая реакция; F_y – боковая сила; P_z – весовая нагрузка; R_z – вертикальная реакция; V_k – вектор скорости колеса; δ – угол увода

Рисунок 12 – Увод в пятне контакта с нагрузками

Если покрышка подвергается скручиванию, то частицы, находящиеся в пятне контакта, будут постоянно стремиться вернуться к своей исходной форме, и, следовательно, они будут подвергаться боковому отклонению при прохождении через передний, центральный и задний края пятна контакта. Следует отметить, что из-за того, что частицы шины сцеплены между собой, деформация начинается еще до того, как частица достигнет передней границы пятна контакта и продолжается после того, как шина покинет пятно контакта.

На рисунке 13 иллюстрируется деформация, происходящая до, во время и после контакта частицы с дорогой.

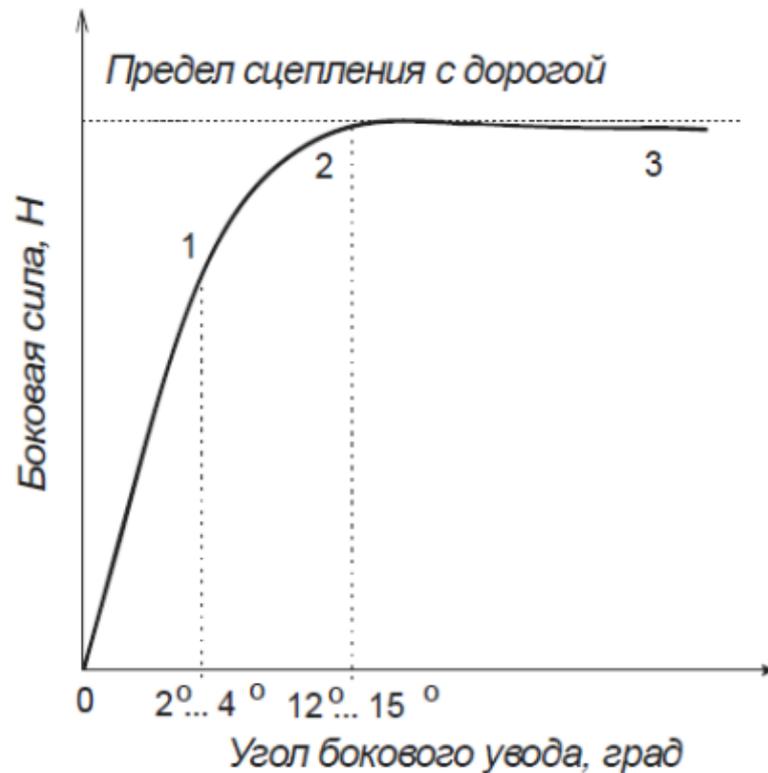


Рисунок 14 – Изменение угла увода от боковой силы

Первый участок соответствует повороту с умеренной скоростью (или небольшой кривизной траектории), когда центробежные силы невелики. В этом случае боковая реакция и угол увода связаны прямо пропорциональной зависимостью. Таким образом, мы определим граничные условия для устойчивого движения автомобиля в случае скоростного поворота, исходя из концепции бокового увода:

$$R_y = k_y \cdot \delta \quad (6)$$

где R_y – боковая реакция;

δ – угол увода;

k_y – коэффициент сопротивления боковому уводу шины.

Шина имеет важный коэффициент сопротивления боковому уводу, который зависит от многих факторов, включая ее конструкцию, геометрию

профиля, давление и весовую нагрузку. Этот коэффициент, который определяется как тангенс угла наклона отрезка $O1$ к оси абсцисс (рисунок 14), определяет способность шины генерировать боковую реакцию при угле увода и ее максимальную боковую силу. Шины с широкими и низкопрофильными профилями, высоким давлением и прижимной силой будут иметь более высокий коэффициент сопротивления боковому уводу.

Когда угол увода достигает от 2° до 4° , происходит частичное проскальзывание участков шины в пятне контакта, что замедляет рост боковой реакции. Дальнейшее увеличение угла увода приводит к росту проскальзывания и при достижении критической точки на третьем участке, начинается полное скольжение контактной зоны колеса в боковом направлении.

Максимальная боковая реакция колеса определяется силой его сцепления с дорогой:

$$R_{y\max} = \varphi_y \cdot R_z \quad (7)$$

где φ_y – коэффициент сцепления в поперечном направлении (по сути коэффициент трения скольжения), в наибольшей степени зависящий от свойств шины и состояния дорожного покрытия;

R_z – вертикальная реакция, равная весовой нагрузке на колесо.

Отсюда можно выразить условие возникновения заноса оси автомобиля:

$$R_{y0} \geq \varphi_y \cdot R_{z0} \quad (8)$$

где R_{y0} и R_{z0} – боковая и вертикальная реакции, действующие на пару колес оси.

Снижение нагрузки на ось автомобиля повышает риск заноса, однако занос одной оси не всегда приводит к потере устойчивости всего автомобиля.

Но если сила инерции оси, вызванная заносом, суммируется с центром масс автомобиля, то неустойчивость может возникнуть внезапно и сильно усилиться. Обычно это происходит при скольжении задней оси, а занос передней оси устраняется автоматически.

График зависимости угла увода от боковой силы имеет нелинейный характер. На первом участке (рисунок 14) угол увода возрастает за счет упругой деформации шины и проскальзывание начинается в задней части пятна контакта. Рост угла увода при увеличении боковой силы происходит менее интенсивно на втором участке, так как линия контакта увеличивается. Плечо сноса боковой силы уменьшается, что снижает стабилизирующий момент шины. На третьем участке происходит полное скольжение, где боковая сила зависит от коэффициента сцепления в поперечной плоскости и достигает максимального значения в точке 2 (рисунок 14).

Силы, возникающие в боковом направлении в шине, вызывают ее упругость и называются боковыми силами увода. Эти силы перпендикулярны направлению движения и возникают в центральной части пятна контакта.

Боковые силы и угол увода взаимосвязаны: угол увода определяется величиной боковых сил, а увеличение боковых сил вызывает увеличение центробежной силы, что приводит к большему углу увода. Боковые силы увода позволяют шине сопротивляться скольжению при повороте. Их величина увеличивается с углом увода и при уменьшении радиуса поворота или увеличении скорости. При увеличении угла увода происходит скольжение протектора покрышки, которое может привести к полному скольжению и снижению сцепления. При выполнении поворота автомобильной шиной выделяют три диапазона – отсутствие скольжения, некоторое скольжение и полное скольжение, которые известны как упругий, переходный и диапазон трения соответственно. Боковая реактивная сила возникает в результате скольжения и является важной причиной трения между шиной и дорогой в диапазоне трения.

На рисунке 15, «показана связь между боковым усилием и углом увода на графике, где можно увидеть три рабочих диапазона. Наклон кривой на линейном (упругом) диапазоне называется поворотной жесткостью шины, и это является важным параметром для анализа поведения транспортного средства при осуществлении поворота» [11].

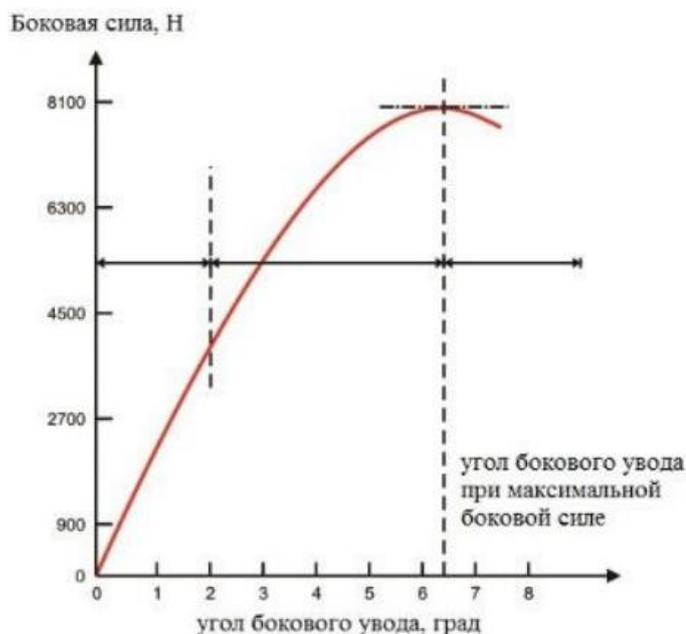


Рисунок 15 – Боковая сила и угол увода при нормальной нагрузке 8000 Н

Уравнение ниже показывает математическую зависимость между боковой силой F_y , углом увода α и поворотной жёсткостью C шины.

$$F_y = C \cdot \alpha \quad (9)$$

«Вершина кривой определяет, какую по величине боковую силу может принять на себя шина. Эта сила называется пределом сцепления. После достижения этого предела боковая сила уменьшится, это передастся водителю в виде лёгкого ощущения на рулевом колесе, указывающем на то, что предел сцепления был превышен. Форма кривой определяет, как

автомобиль будет вести себя в условиях высокого ускорения и превышения силы сцепления колеса с дорогой» [11].

Когда наблюдается острый пик на кривой, это означает, что коэффициент сцепления шины с дорогой быстро меняется при переходе в занос, что может неожиданно возникнуть для водителя. Если же верхняя часть кривой имеет плоский профиль, то это указывает на плавный переход, что дает водителю возможность предугадать момент, когда автомобиль может начать заносить. Однако, гоночные шины более чувствительны к боковым нагрузкам и имеют более резкий переход от сцепления к заносу, поэтому гонщик должен быть чувствителен к этому моменту и контролировать управление автомобилем.

Кроме того, шины, работающие при большом угле увода (рисунок 16), могут значительно затруднить поступательное движение, которое увеличивается с углом увода. В таком случае, если водителю нужно замедлиться, он может обойтись без применения тормозов, бросив машину в поворот и создав большой угол увода.

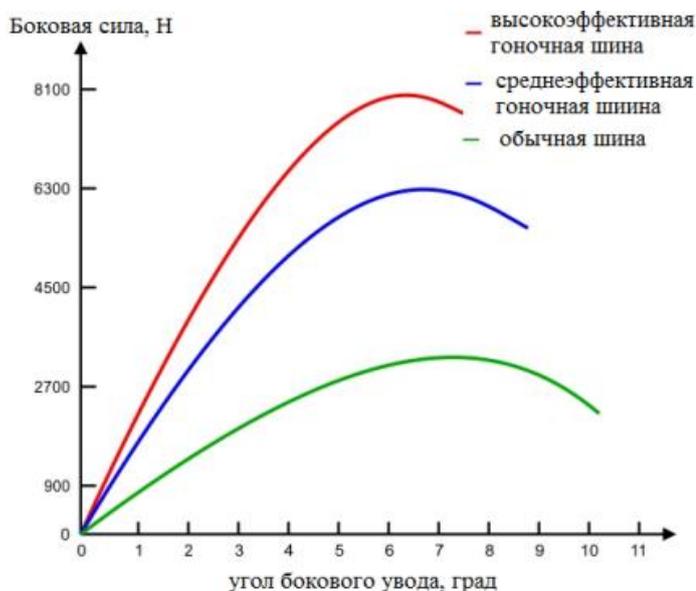


Рисунок 16 – Зависимость угла увода от боковой силы для трёх типов шин (кривые построены произвольно)

«Чтобы немного прояснить ситуацию, определим коэффициент поперечной силы. Это аналогично коэффициенту трения. В целом это всего лишь способ нормализации боковой силы.

Математическое определение выглядит следующим образом:

$$\varphi_{yF} = \frac{F_y}{F_z} \quad (10)$$

где φ_{yF} – коэффициент боковой силы;

F_y – горизонтальная нагрузка;

F_z – вертикальная нагрузка.

Результаты проведения опыта для определения зависимости угла увода от боковой силы при нескольких вертикальных нагрузках показаны на рисунке 17» [16].

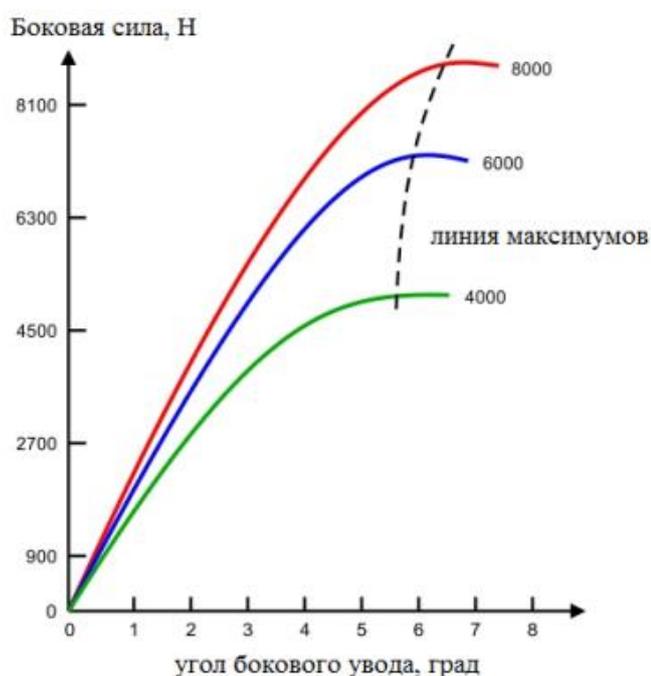


Рисунок 17 – Угол увода от боковой силы при нескольких нагрузках

Когда мы заменяем построение графика поперечной силы на график коэффициента боковой силы, тогда можно увидеть результаты, представленные на рисунке 18.

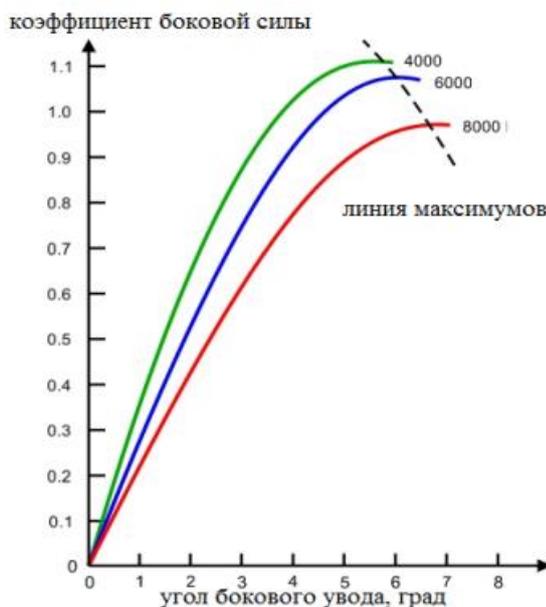


Рисунок 18 – Угол увода от коэффициента боковой силы при нескольких нагрузках

Действительно, график коэффициента боковой силы предоставляет множество информации. Мы можем заметить, что с увеличением вертикальной нагрузки коэффициент поперечной силы уменьшается. В то же время, поворотная жесткость шины (линейный наклон на рисунке 18) увеличивается при более высоких вертикальных нагрузках.

«Сравнивая графики, можно заметить, что соотношение F_y/F_z уменьшается, но боковая сила продолжает расти с ростом вертикальной нагрузки. В итоге, увеличение боковой силы происходит с меньшей скоростью при более высоких вертикальных нагрузках, что приводит к нелинейной зависимости между вертикальной нагрузкой и боковой силой, как показано на рисунке 19» [8].

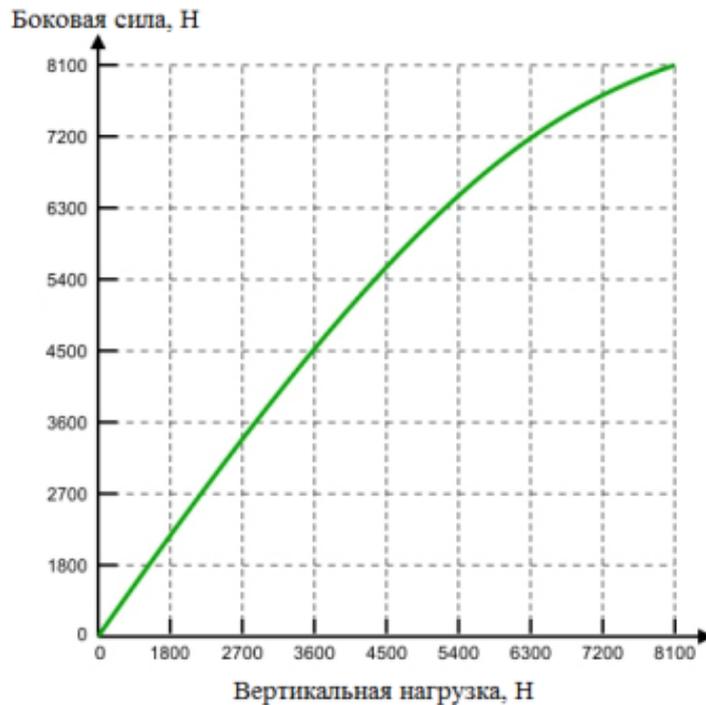


Рисунок 19 – Зависимость боковой силы от вертикальной нагрузки при одном угле увода

«Анализируя рисунок 19, мы можем сделать выводы о поведении пары шин, которые работают параллельно друг другу, например, на передней или задней оси автомобиля. При боковых ускорениях происходит перенос нагрузки с внутренней шины на внешнюю. Общая вертикальная нагрузка на ось остается неизменной, но общая боковая сила, создаваемая осью, будет меньше, чем если бы не было переноса нагрузки.

Чтобы лучше понять этот процесс, рассмотрим пример на рисунке 19. Предположим, что автомобиль «Формула Студент» имеет вес около 3600 Н на каждой из задних шин. Ожидаемая боковая сила на одной шине, рассчитанная в соответствии с графиком (рисунок 19), составляет около 4500 Н, следовательно, общая боковая сила на ось будет равна 9000 Н. Если у нас есть пятьдесят процентов передачи боковой нагрузки на заднюю ось, то внешнее колесо будет иметь вертикальную нагрузку около 5400 Н, в то время как внутреннее колесо будет иметь всего около 1800 Н вертикальной нагрузки» [8].

«При повторном рассмотрении рисунка 19 можно заметить, что общая боковая сила, возникающая на внешней шине в данных условиях, составляет около 6500 Н, тогда как на внутренней шине она генерируется только в размере 2200 Н. В результате общая боковая сила будет составлять 8700 Н, что приведет к потере боковой силы. Хотя значения на графике произвольны, наблюдаемое поведение шины по отношению к вертикальной нагрузке верно. Эта особенность поведения шин при переносе боковой нагрузки имеет ключевое значение для управления гоночным автомобилем и учитывается при конструировании и настройке его для изменения управляемости и маневренности» [8].

Стоит отметить, что представленные на графиках и рисунках значения характеристик шин являются общими результатами опытов и расчетов, а не конкретными значениями с данной маркой шин. В настоящее время все программы, связанные с расчетами и симуляцией шин, используют эти формулы как основу математических моделей для сокращения времени получения надежных результатов. Поэтому не имеет смысла рассчитывать данные на основе имеющихся параметров, но необходимо обратить внимание на теоретические принципы, на которых основаны эти симуляции.

2.2 Анализ влияния коэффициента сцепления и его составляющих на поведение автомобиля при маневре

Теперь зная, какие силы возникают в пятне контакта при совершении маневра на автомобиле, выявим факторы шины, которые помогают гарантировать максимальное эффективное поведение автомобиля на дороге.

Есть еще одно немаловажное понятие – коэффициент сцепления шины с дорогой. Рассмотрим, что это за коэффициент, и как он помогает автомобилю при маневрах.

«Коэффициент сцепления дает возможность автомобильным колёсам, при нормальной нагрузке, передавать и воспринимать касательные силы при

движении по дороге и является важным качеством, позволяющим автомобилю передвигаться. Надёжное сцепление колеса с дорогой повышает безопасность движения. Данное качество оценивают коэффициентом сцепления φ – отношением максимальной касательной реакции в пятне контакта T_{max} к нормальной нагрузке G_k или реакции, воздействующей на колесо:

$$\varphi = \frac{T_{max}}{G_k} \quad (11)$$

Различают два вида коэффициента сцепления при качении колеса в плоскости вращения: без буксования или скольжения; при буксовании или юзе, а также коэффициент сцепления в поперечной плоскости при боковом скольжении колеса. Коэффициент сцепления при отсутствии буксования или скольжения можно считать коэффициентом сцепления покоя. Когда буксование и скольжение равны оптимальным значениям коэффициент сцепления становится равен коэффициенту трения покоя. Однако, в этом случае присутствует проскальзывание элементов протектора «вблизи контурной линии пятна контакта» [11].

«Коэффициент сцепления покоя несколько больше, чем коэффициент сцепления при скольжении и юзе. У стандартных шин коэффициент сцепления при буксовании на 25 % меньше, чем в покое.

Взаимодействие шины с твёрдой дорогой характеризуется трением контактирующих тел и складывается из деформационной и молекулярной составляющих. Первая обусловлена внедрением в тело протектора шероховатостей дороги, что препятствует скольжению шины по поверхности, вторая – межмолекулярным взаимодействием на границе соприкосновения шины с дорогой. По-другому эти составляющие можно назвать – гистерезис и адгезия.

Адгезия появляется в результате межмолекулярного скрепления между резиной покрышки и поверхностью асфальта. Это больше относится к сухой поверхности асфальта, но адгезия значительно снижается в условиях мокрой поверхности. Следовательно, во время дождя, снижается коэффициент сцепления с дорогой.

Чтобы объяснить, как гистерезис влияет на сцепление между шиной и дорогой, уточним, что такое гистерезис. По отношению к покрышкам, гистерезис – это свойство резины возвращаться в естественное состояние после деформации, но с задержкой. Например, если вы нажмете ногтем на протектор шины с низким гистерезисом, резина быстро вернется в свое естественное состояние. Сделайте то же самое с шиной с высоким гистерезисом, и вмятина останется там на несколько секунд, возвращаясь гораздо медленнее.

Когда шина деформируется, она приобретает потенциальную энергию, которая высвобождается при возвращении в нейтральное состояние. При гистерезисе, энергия теряется, преобразовываясь в тепло, следовательно, когда напряжение снимается, возникает сила сопротивления между протектором и дорогой. Но точный механизм того, как возникает эта сила, не полностью понятен» [8].

Рассмотрим рисунок 20, где присутствует некоторое скольжение между резиной и неровной поверхностью. «Если шина восстанавливает своё прежнее положение медленно, проходя через неровности, как в резине с высоким гистерезисом, то она не может давить на нижнюю часть поверхности неровностей, так как она давит на поверхность в верхней части неровностей. Эта разница давления между верхними и нижними краями неровностей приводит к силам трения даже тогда, когда поверхности смазаны. Механизм, о котором идет речь, показан на рисунке 20, первоначально взятом из книги Хэйни» [30].



Рисунок 20 – Гистерезис при скольжении шины

Размеры колеса и рисунок протектора представляют собой конструктивные особенности, которые существенно влияют на коэффициент сцепления. Увеличение диаметра и ширины беговой дорожки служит причиной незначительного увеличения коэффициента сцепления на сухих твердых поверхностях. Это связано с расширением площади контакта между шиной и дорогой. Однако, рисунок протектора оказывает гораздо большее влияние на уровень коэффициента сцепления.

Шины с гладким протектором обладают минимальным сцеплением на мокрых, заснеженных и обледенелых асфальтовых дорогах. В то же время, шины с мелким расчлененным протектором, включающим продольные ребра и шашки, обеспечивают наибольший коэффициент трения на дорогах с твердым и сухим покрытием. В случае твердых мокрых дорог на уровень коэффициента сцепления оказывает значительное влияние способность шины удалять грязь и влагу из зоны контакта. Для этого протектор должен иметь продольные ребра и надрезы, расчлененные под углом 45 градусов.

Установка шипов противоскольжения и использование специальной резины в протекторе повышает коэффициент сцепления на скользких дорогах в 1,5-2 раза.

Шины с высокими грунтозацепами необходимы на автомобилях, работающих на деформирующихся покрытиях. Они характеризуются сильной расчлененностью протектора и рисунком в виде косой ёлки, который обеспечивает самоочищение от влажного грунта и снега. [5,12,20]

Стоит также отметить, что скорость движения автомобиля существенно влияет на коэффициент сцепления. На дорогах с твердым и сухим покрытием при увеличении скорости коэффициент сцепления уменьшается, так как резина не успевает полностью внедриться в микронеровности дорожного покрытия. Это приводит к тому, что протектор не способен обеспечить полную передачу силы сцепления, что приводит к снижению коэффициента сцепления.

Нормальная нагрузка на колесо также влияет на коэффициент сцепления. При увеличении нагрузки на колесо, контактная площадь с дорогой увеличивается, что приводит к увеличению коэффициента сцепления. Однако, если нагрузка на колесо слишком высока, это может привести к деформации шины и уменьшению коэффициента сцепления.

Еще одним фактором, влияющим на коэффициент сцепления шины с дорогой, является состояние дорожного покрытия. Если дорога гладкая и сухая, коэффициент сцепления будет высоким. Но если на дороге есть лужи воды, снег или лед, то коэффициент сцепления может резко снизиться.

Важно отметить, что на коэффициент сцепления влияют не только отдельные факторы, но и их комбинация. Например, на мокром асфальте при высокой температуре шины и умеренном давлении воздуха коэффициент сцепления будет высоким, но если к этому добавить большую нагрузку на колесо, то это может привести к уменьшению сцепления и потере контроля над автомобилем. Поэтому, при эксплуатации автомобиля важно учитывать

все факторы, влияющие на коэффициент сцепления, и принимать соответствующие меры для обеспечения безопасности на дороге. [7,9]

В. Н. Кравец пишет: «С увеличением нормальной нагрузки на колесо на твёрдых сухих покрытиях происходит снижение коэффициента сцепления, так как коэффициент трения резины уменьшается с ростом давления. На обледенелой и заснеженной дорогах относительное изменение коэффициента сцепления при увеличении нагрузки больше, чем на дорогах с асфальтобетонным покрытием. На мокрых и грязных дорогах возрастание нормальной нагрузки обеспечивает увеличение коэффициента сцепления» [8].

Как видно из таблицы 1, средние коэффициенты сцепления на разных типах дорог значительно различаются.

Таблица 1 – Коэффициенты сцепления

Опорная поверхность		Коэффициент продольного сцепления
Тип	Состояние	
Асфальтобетон	Сухой	0,7-0,8
	Мокрый	0,45-0,55
Щебёнчатое покрытие	Сухой	0,5-0,7
	Мокрый	0,3-0,5
Гравий	Сухой	0,5-0,6
Булыжник	Сухой	0,4-0,55
Грунтовая дорога	Сухая	0,4-0,6
	Мокрая	0,3-0,45
	В период распутицы	0,15-0,25
Песок	Сухой	0,2-0,4
	Мокрый	0,35-0,5
Снег	Укатанный	0,15-0,25
	Сыпучий	0,1-0,2
Гладкий лёд		0,07-0,2

На сухом асфальте коэффициент сцепления достаточно высокий, что обеспечивает хорошую управляемость и курсовую устойчивость автомобиля. На мокром асфальте коэффициент сцепления уже снижается примерно на 30 %, что может приводить к заносам и потере контроля над автомобилем. На

снегу и наледи коэффициент сцепления еще сильнее снижается, что делает движение по таким дорогам очень опасным и требует использования специальных зимних шин.

В качестве вывода по разделу можно заключить, что шина является одним из наиболее важных элементов конструкции автомобиля, от которого зависит безопасность и комфорт при движении. На шину при движении воздействуют различные внутренние и внешние силы, которые могут привести к ее деформации, износу, разрыву или потере сцепления с дорогой.

Силы сцепления, возникающие в точке контакта шины с дорогой, оказывают наиболее существенное влияние на поведение автомобиля при маневре. Коэффициент сцепления зависит от многих факторов, включая состояние дорожного покрытия, тип и состояние шин, нагрузку на шину и погодные условия. Важно понимать, что коэффициент сцепления не является постоянной величиной и может изменяться в зависимости от условий. Например, при дожде или снеге на дороге коэффициент сцепления уменьшается, что требует более аккуратного управления автомобилем.

В то же время, составляющие коэффициента сцепления, такие как сцепление поперечное и продольное, оказывают также значительное влияние на поведение автомобиля при маневре. Сцепление продольное характеризует способность шин передавать мощность двигателя на дорогу, а сцепление поперечное - способность шин передавать боковые силы на дорогу при повороте.

Таким образом, выбор шин для автомобиля и работа с параметрами сцепления являются важными аспектами, которые нужно учитывать при планировании маневров и повышении безопасности движения.

3 Экспериментальные и аналитические исследования

3.1 Расчет сцепных характеристик шин экспериментальным методом

И так, начнем с того, что практически все параметры, которые мы уже изучили, без исключения, в теории влияют на поведение автомобиля при маневрировании на различных трассах.

На сегодняшний день, в Тольяттинском государственном университете есть стенд (рисунок 21), позволяющий получить коэффициенты сцепления при разном давлении шины в зависимости от нагрузки.



Рисунок 21 – Испытательный стенд для расчета коэффициентов сцепления

Для того, чтобы получить данные по коэффициентам сцепления произведем расчеты с помощью стенда.

Автомобиль находится под воздействием различных сил в любой момент времени, которые влияют на него только через четыре контактные точки – пятна контакта колес с дорожным покрытием. Предлагается рассмотреть влияние давления и нагрузки на шины на силу сцепления колес,

используя шину «Hoosier 13×7,5» с составом резины R25B, используемую Тольяттинским государственным университетом в своем болиде EScorpion. [19]

Замеры проводились при разных нагрузках и давлениях воздуха внутри колеса. Конструкция стенда представляет собой плиту с дорожным покрытием для создания нагрузки на колесо с помощью винта, расположенного сзади стенда. Под площадкой установлен механизм для движения в горизонтальной плоскости, а также тензодатчики для измерения нагрузки и силы сцепления в вертикальной и горизонтальной плоскостях, данные с которых передаются на осциллограф. Результатом работы являются значения сил, при которых колеса начинают проскальзывать и значение коэффициента сцепления шины. [6,20]

«Датчик вертикальной нагрузки был откалиброван при помощи объекта с известной массой, которой в нашем случае было тело с массой 100 кг. В результате был определен тарировочный коэффициент, равный 78,4 Н на одно деление на осциллографе. Горизонтальный тензодатчик был откалиброван при помощи динамометра, посредством периодических нагружений. В момент замеров были сняты показания с динамометра и осциллографа, после чего был определен тарировочный коэффициент, соответствующий 45,9 Н на одно деление. Все полученные замеры отображаем в таблице 2» [21].

Таблица 2 – Рассчитанные значения для испытательного стенда

Нагрузка в вертикальной плоскости, кг	Нагрузка в вертикальной плоскости, Н	Показания осциллографа (деления)	Нагрузка в горизонтальной плоскости, Н	Показания осциллографа (деления)
60	588	7,5	1000	~ 22
70	686	8,75	1200	~ 26
80	784	10	1400	~ 30,5
90	882	11,25	1600	~ 35
100	980	12,5	1800	~ 39
110	1078	13,75	2000	~ 43,5

«Далее колесо устанавливается на испытательный стенд, на которое прикладывается заданная нагрузка при помощи винта, который прижимает шину через ступицу колеса к площадке стенда. Величина этой нагрузки рассчитывается на основе 3D-модели автомобиля с учетом распределения веса по осям и положению центра тяжести.

На основе опыта предыдущих лет известно, что вес болида равномерно распределяется примерно в соотношении 40 % на переднюю ось и 60 % на заднюю ось. С учетом этого, масса автомобиля была принята равной 280 кг, а масса автомобиля с пилотом – 365 кг» [21].

Учитывая выходные данные, формулы для расчета коэффициента сцепления выглядят так:

$$\varphi_{\text{п}} = \frac{F_c}{F_B} \quad (12)$$

$$\varphi_{\text{пр}} = \frac{F_c}{F_B} \quad (13)$$

где $\varphi_{\text{п}}$ – коэффициент сцепления в поперечном направлении;

$\varphi_{\text{пр}}$ – коэффициент сцепления в продольном направлении;

F_c – сила, при которой срывает колесо;

F_B – нагрузка на колесо при выполнении замера силы срыва.

«В результате выполнения работы были получены следующие данные, указанные в таблице 3.

На основании результатов работы можно сделать вывод, что оптимальное сцепление болида с дорожным полотном достигается при давлении внутри колеса, равном 1,2 бара. При этом наблюдается общая тенденция: коэффициент поперечного сцепления достигает максимальных значений при давлении внутри колеса, равном 90 кг, в то время как коэффициент продольного сцепления примерно одинаков во всех диапазонах измерений и не имеет ярко-выраженного пика в частном случае» [21].

Таблица 3 – Рассчитанные по результатам лабораторной работы коэффициенты сцепления шины Hoosier

Давление	Коэффициенты сцепления	60 кг	70 кг	80 кг	90 кг	100 кг	110 кг
0,6 бар	$\Phi_{п}$	1,48	1,87	1,87	1,72	1,6	1,79
	$\Phi_{пр}$	1,48	1,4	1,46	1,45	1,45	1,49
0,8 бар	$\Phi_{п}$	1,87	2,14	1,99	1,98	1,92	1,83
	$\Phi_{пр}$	1,48	1,53	1,46	1,5	1,45	1,49
1 бар	$\Phi_{п}$	1,95	2,00	2,05	1,72	1,69	1,87
	$\Phi_{пр}$	1,48	1,53	1,46	1,5	1,49	1,49
1,2 бар	$\Phi_{п}$	2,26	2,4	2,4	2,08	2,15	2,21
	$\Phi_{пр}$	1,48	1,47	1,52	1,5	1,54	1,57
1,4 бар	$\Phi_{п}$	2,03	2,00	2,22	2,13	1,87	2,00
	$\Phi_{пр}$	1,48	1,6	1,58	1,56	1,45	1,49

Для дальнейшей работы, мы можем использовать полученную таблицу данных по коэффициентам сцепления для проведения симуляции и выбора параметров, удовлетворяющих нашим требованиям по критерию максимально эффективного коэффициента сцепления.

3.2 Тягово-динамические параметры автомобиля

После выполнения анализа данных, которые мы получили на стенде расчета коэффициента сцепления, следующим этапом является тяговый расчет. Следует заметить, что при проектировании новых моделей автомобилей необходимо определить его тягово-скоростные свойства и условия эксплуатации. В случае проекта «Формула Студент», условия нам понятны, но какими характеристиками он должен обладать, мы должны проанализировать сами. Для достижения лучшего результата используются разные методы расчета, где в основе лежат науки об эксплуатационных свойствах, которые характеризуют возможность эффективно использовать болид в гоночных условиях и соответствия его конструкции под те же гоночные условия.

«Сами тягово-скоростные свойства определяют динамичностью, прохождением участков трассы с максимально возможной средней скоростью.

Для проектирования необходимы параметры, а их три вида:

- заданные,
- выбираемые,
- расчетные.

Параметры, определяемые техническим заданием: тип автомобиля; грузоподъемность m или пассажировместимость; максимальная скорость автомобиля и соответствующее значение коэффициента дорожного сопротивления; максимальное сопротивление, преодолеваемое автомобилем на первой передаче; тип двигателя (с искровым зажиганием или дизель); колесная формула.

Выбираемые параметры: снаряженная масса автомобиля; лобовая площадь (площадь миделя); распределение массы по осям груженого автомобиля; угловая скорость коленчатого вала ω двигателя при максимальной мощности; механический коэффициент полезного действия (КПД) трансмиссии; коэффициент аэродинамического сопротивления» [14]. «Величины этих параметров задаются на основании экспериментов и статистических данных по существующим моделям автомобилей, аналогичным проектируемому, с учетом тенденции развития автомобильной техники и перспективного типажа автомобилей.

Расчетные параметры и зависимости: максимальная мощность двигателя; передаточное число главной передачи; передаточные числа коробки передач и раздаточной коробки; а также зависимости:

- внешняя скоростная характеристика двигателя;
- тяговая характеристика автомобиля и силовой баланс;
- динамическая характеристика автомобиля;
- зависимость ускорения, времени и пути разгона от скорости автомобиля;

- мощностной баланс;
- топливно-экономическая характеристика автомобиля» [14].

Последующие полученные данные нам потребуются для сравнительного анализа с проведением виртуальных тестов движению автомобиля по кругу.

3.3 Подготовка аналитических данных для математического анализа на основе тягово-динамического расчета

Исходные данные для проведения тягово-динамического расчета электроботида EScorpion класса «Formula Student» сведем в таблицу 4.

Расчет производили в соответствии с методикой, описанной в источнике [14].

Таблица 4 – Исходные данные для проведения тягово-динамического расчета

Параметр	Значение
Колесная формула	4x2
Количество мест	1
Снаряженная масса m_0 , кг	280
Максимальная скорость V_{max} , км/ч (м/с)	123,48(34,3)
Угловая скорость ω_e^{max} , рад/с (об/мин)	3000 (356,8)
Максимальная мощность двигателя N_e^{max} , кВт	52
Максимальный крутящий момент двигателя M_e^{max} , Н·м	226
Тип и размерность колеса	200/75R13
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x	0,453
Величина максимального преодолеваемого уклона i , %	0,34
КПД трансмиссии $\eta_{тр}$	0,93
Габаритная ширина автомобиля B , мм	1444
Габаритная высота автомобиля H , мм	1136
Коэффициент сопротивления качению f_0	0,02
Передаточные числа:	
- Главная передача	3

«Подготовка исходных данных для тягового расчета.

Полная масса болида:

$$m_a = m_0 + m_q \cdot n + m_b \cdot n, \quad (14)$$

где: m_0 – снаряженная масса болида, кг;

$m_q = 75$ кг – масса одного человека;

n – число пассажиров;

m_b – масса багажа» [22].

$$m_a = 280 + 75 \cdot 1 = 365 \text{ кг}$$

Полный вес болида:

$$G_a = m_a \cdot g, \quad (15)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

$$G_a = 365 \cdot 9,81 = 3580,7 \text{ Н}$$

«Для подбора шин необходимо знать нагрузку, приходящуюся на одно колесо, а для этого – распределение нагрузки по осям автомобиля.

У легковых автомобилей распределение нагрузки от полной массы по осям зависит в основном от компоновки: у автомобилей, имеющих классическую компоновку, на заднюю ось приходится от 52 % до 55 % нагрузки от полной массы; у автомобилей с задним расположением двигателя – от 56 % до 60 %; у переднеприводных – от 40 % до 45 %; у полноприводных – от 45 % до 55 %.

Болид имеет заднеприводную компоновку (задние колеса ведущие), принимаем распределение веса по осям в соотношении: 40 % на передние колеса и 60 % на задние» [14].

«Вес, приходящийся на ведущие колеса:

$$G_2 = 0,6 \cdot G_a = 0,6 \cdot 3580,7 = 2148,4 \text{ Н;}$$

Вес, приходящийся на ведомые колеса:

$$G_1 = 0,4 \cdot G_a = 0,4 \cdot 3580,7 = 1432,3 \text{ Н}»$$

Параметры обтекаемости автомобиля.

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x зависит от формы, длины автомобиля и качества его окраски. Часто применяемый в литературе коэффициент обтекаемости k связан с C_x следующей зависимостью» [14].

«Коэффициент обтекаемости:

$$k = \frac{C_x \cdot \rho}{2}, \quad (16)$$

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

$$k = \frac{0,7 \cdot 1,293}{2} = 0,452$$

Лобовая площадь автомобиля:

$$F = 0,8 \cdot B \cdot H, \quad (17)$$

где: B – габаритная ширина автомобиля, м;

H – габаритная высота автомобиля, м.

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

Имея параметры трех вариантов шин, рассчитаем радиус качения по данным шин по формуле:

$$r_k = 0,5 \cdot d + \lambda_z \cdot H, \quad (18)$$

где: d – посадочный диаметр шины, м;

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

H – высота профиля шины, м» [14].

$$r_k = 0,5 \cdot 0,315 + 0,85 \cdot 0,15 = 0,285 \text{ м}$$

$$r_k = 0,5 \cdot 0,295 + 0,85 \cdot 0,15 = 0,275 \text{ м}$$

$$r_k = 0,5 \cdot 0,223 + 0,85 \cdot 0,15 = 0,193 \text{ м}$$

«Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) двигателя

Рассчитывается ВСХ двигателя по формуле:

$$N_e = N_{\max} \left[\frac{\omega_e}{\omega_N} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^2 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^3 \right], \quad (19)$$

где: ω_e – текущее значение угловой скорости вала, рад/с;

ω_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:

$$M_e = \frac{N_e}{\omega_e} \quad (20)$$

Рассчитываем зависимости $N_e(\omega_e)$ и $M_e(\omega_e)$. Результаты расчетов сводим в таблицу 5 и представляем в виде графика (рисунок 22). Для данного двигателя, данные полученный при испытаниях со стенда, которые вы можете увидеть в таблице ниже» [14].

Из рассмотренных тем становится ясно, что важность тягово-динамического расчета и расчета сцепных характеристик шин состоит в том, что они позволяют провести точные расчеты и установить взаимосвязи между внешними и внутренними силами, влияющими на работу автомобиля и шин.

Таблица 5 – Результаты со стенда испытания двигателя

$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n_e, \text{об/мин}$	$N_e, \text{кВт}$
225,4	1329	30556
223,4	1464	33378
221,4	1533	34644
216,6	1814	40098
212,6	1954	42382
210,4	1980	42518
208,4	2049	43568
210,4	2115	45426
222,8	2243	51004
204,2	2368	49362
196	2481	49616
183,6	2545	47680
181,6	2575	47712
165	2706	45568
158,8	2782	45102
150,6	2823	43388
143,4	2882	42168
134,2	2966	40590

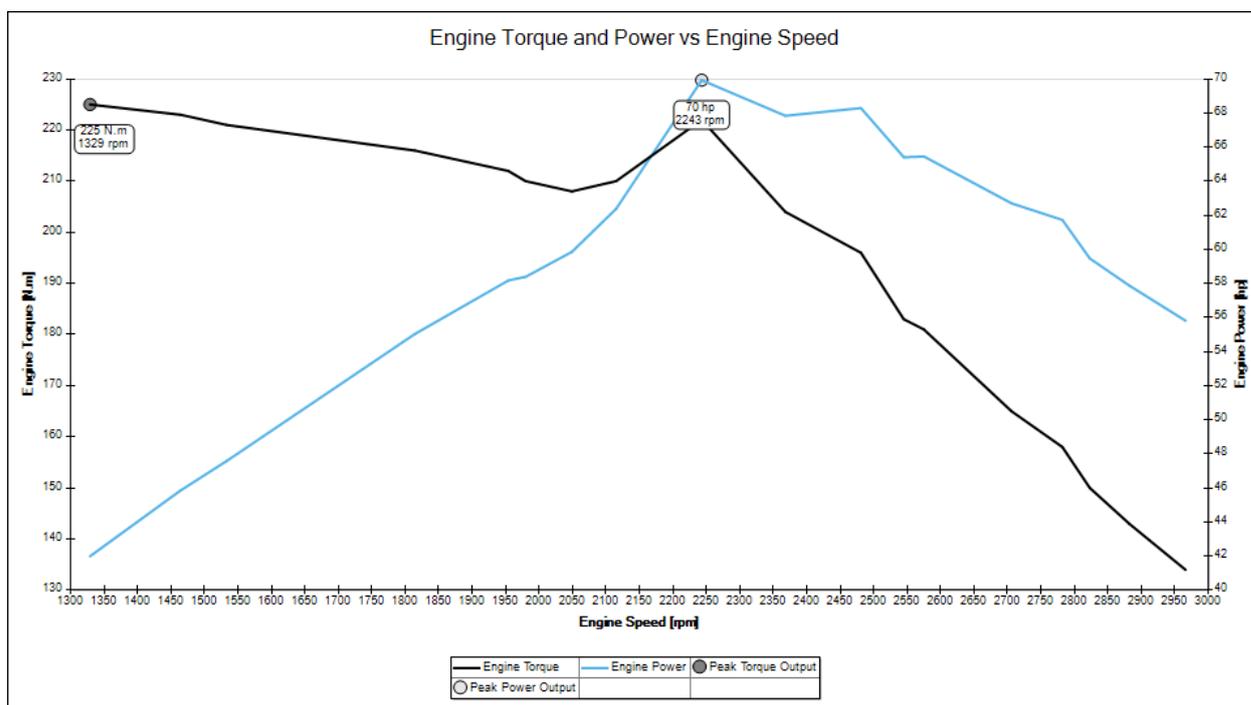


Рисунок 22 – График внешней скоростной характеристики двигателя, полученный при помощи анализа данных в программе Optimum Lap

В качестве вывода по разделу можно резюмировать, что подготовка аналитических данных дает возможность проводить математический анализ работы систем автомобиля и улучшать его технические характеристики для более эффективной и безопасной эксплуатации.

Тягово-динамические параметры автомобиля позволяют определить максимальную мощность двигателя, производительность трансмиссии, максимальную скорость, ускорение и другие параметры, которые необходимы для повышения управляемости и безопасности при движении.

Расчет сцепных характеристик шин экспериментальным методом позволяет получить данные о сцеплении шин с дорогой, поперечного и продольного коэффициентов сцепления, а также других параметров, которые необходимы для более точного моделирования работы систем автомобиля и выбора более эффективных шин.

Таким образом, проведение тягово-динамического расчета и расчета сцепных характеристик шин являются важнейшими этапами в процессе создания и улучшения автомобильных конструкций. Они позволяют проводить точный математический анализ и определять наиболее важные параметры, которые влияют на работу автомобиля и его безопасность.

4 Моделирование движения автомобиля по кругу

4.1 Основные параметры для математического моделирования

В 21 веке практически все рассчитывается и проектируется с помощью цифровых помощников, к примеру, таких программ моделирования как Catia, Компас 3D, AutoCAD и других подобных им.

Для разных ниш есть своя САД-программа, впрочем, как и в нашем случае. При производстве тягово-динамического расчета необходима подготовка исходных данных, которые мы так же можем использовать и для программы «OptimumLap». Это программное обеспечение, позволяющее упрощенно моделировать транспортные средства, которое оценивает характеристики транспортного средства на заданной гоночной трассе.

Интересный факт – программа разработана компанией «OptimumG». Основатель этой компании Claude Rouelle (Клод Руле), который работал в основном с гоночными командами Формул, также работал с несколькими другими гонщиками, в том числе: Эриком Комасом, Жан-Марком Гуноном, Оливье Панисом (Формула 3000 Европа), Россом Чивером, Джонни Хербертом, Агсом Габриэле Тарквини, Янником Далмасом (Формула 1), Ари Луендийком, Стефаном Йоханссоном (Indycar USA) и многими другими.

Клод был техническим представителем компании Reynard Motorsport. Он также выиграл чемпионат Формулы-3 с ORECA и по сей день является судьей международных соревнований «Формула Студент». [27,28,33]

Обращая внимание на все вышеперечисленное, можно отметить, что при работе в OptimumLap можно выбрать заготовленную конфигурацию трасс проекта «Формула Студент» и других треков, на которых проводятся соревнования.

Принцип расчета в этой программе схож и с нашим тягово-динамическим расчетом, но в данной программе мы можем отследить

больше параметров автомобиля, не только на выходе, но и на протяжении всего построенного маршрута.

Так же здесь присутствует вариативность, что позволяет сравнить полученные показатели сразу, для наглядности представленных в виде схемы и графиков.

При переходе в рабочее окно (рисунок 23) видно, что в программе можно выбрать заготовленный разработчиком автомобиль, загрузить свои параметры автомобиля из любого доступного источника. Но нас больше интересует создание своего автомобиля, вернее возможность задать свои расчетные параметры нашего болида.



Рисунок 23 – Интерфейс программы OptimumLap

Аналогично можно и поступать с трассой. Но есть небольшое исключение, для расчета на конфигурации трассы «Восьмерка», заготовленной траектории нет, её в дальнейшем придется создавать самостоятельно.

Продолжая подготовку к симуляции, мы обратимся ко второй колонке – там мы уже задаем наши расчетные параметры из тягово-динамического расчета.

Как упоминалось выше – программа практически разрабатывалась для команд проекта «Формула Студент» и сразу с первой строки мы можем задать для программы параметр, что мы будем считать автомобиль именно формульного класса (рисунок 24).

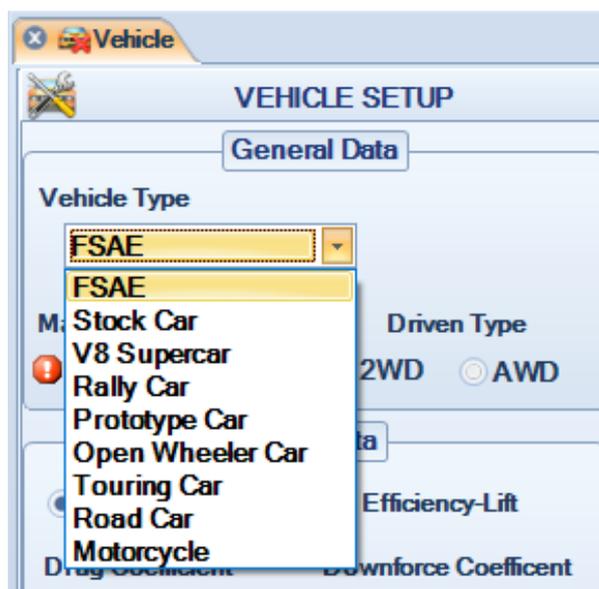


Рисунок 24 – Выбор класса автомобиля в программе OptimumLap

Так же в этой строке в разделе выбирается тип привода автомобиля: передний, задний или полный и масса болида (рисунок 25).

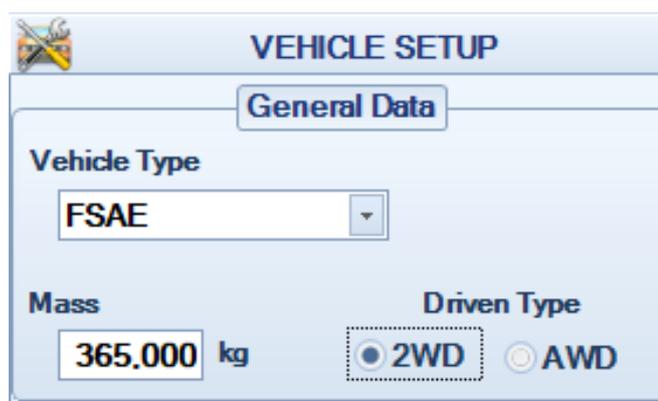


Рисунок 25 – Ввод базовых параметров в программу OptimumLap

Так как наш болид формульного типа, то и параметр в окне на рисунке 25 задается соответствующий FSAE, дополнительно к этому задаем параметр массы, в соответствии с исходными данными для тягово-динамического расчета.

Следующим этапом является включение в расчет аэродинамических показателей (рисунок 26) в раздел.

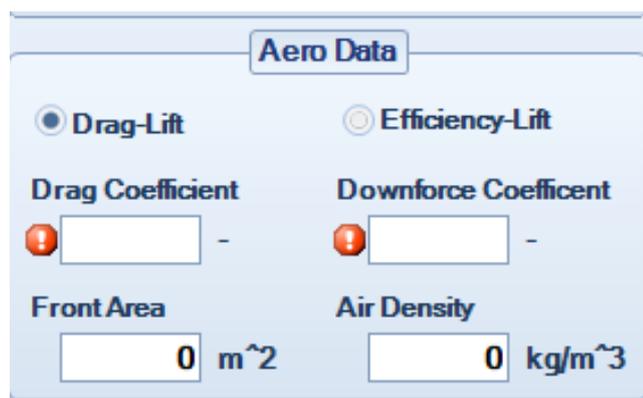


Рисунок 26 – Аэродинамические данные

При использовании аэродинамических элементов, таких как: антикрыло переднее, заднее и так далее, задаются параметры коэффициента сопротивления и прижимной силы. Второстепенными уже являются лобовая площадь автомобиля и плотность воздуха.

Продолжением является ввод данных параметров шин (рисунок 27), которые мы опытным путем получили на стенде в лаборатории ТГУ.

Радиус колеса мы знаем исходя из размеров шины. Далее вводим радиус качения, полученный посредством тягово-динамического расчета.

Поперечный и продольный коэффициент сцепления считается двумя способами:

- в лабораторных условиях (как получали в рамках команды ТГУ);
- приобретением данных по шинам у завода изготовителя или у лабораторий испытаний шин.



Рисунок 27 – Параметры шин

Остается немаловажный этап, где нам необходимо провести дополнительное лабораторное исследование и обработку данных двигателя, уточнить его обороты и крутящий момент.

Опять же, в нашем случае мы все показатели замеряем на стенде, так как у нас уже есть готовый мотор, который нам необходимо откалибровать под наши параметры мощности.

На рисунке 28 представлено окно программы, куда необходимо внести характерные точки испытаний.

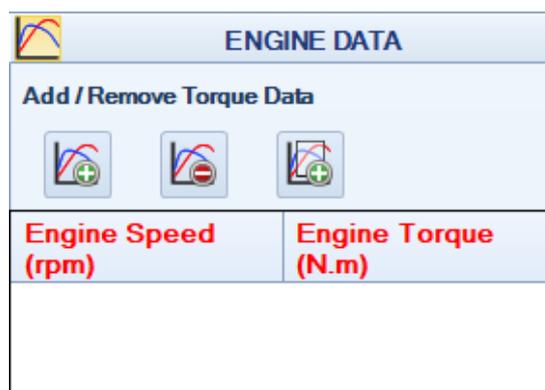


Рисунок 28 – Внешние скоростные характеристики двигателя

После того как добавили внешние скоростные данные двигателя, в окне, показанном на рисунке 29 выбираем тип топлива.

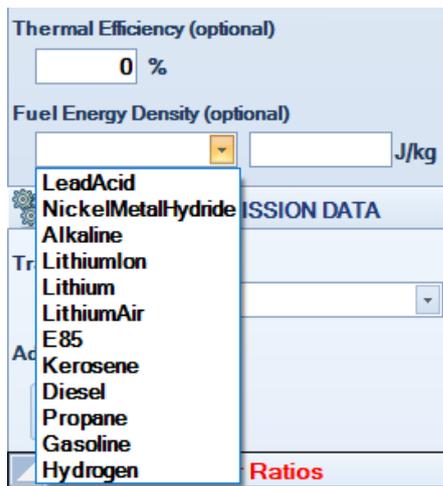


Рисунок 29 – Выбор типа топлива двигателя

В нашем случае LithiumIon (литий-ионный), но выбор достаточно широкий. В проекте «Формула Студент» как и во всех видах гонок применяются различные типы топлива.

Следующим шагом вводим передаточные числа (рисунок 30).



Рисунок 30 – Данные коробки передач

Передаточные числа можно узнать из мануала предоставленным производителем, как в нашем случае, или же ручным подсчетом зубцов шестерен, но, как правило, вторым редко пользуются, так как вся информация есть в свободном доступе. Или же если команда самостоятельно изготавливает коробку передач, то она может, опираясь на математическую симуляцию, подобрать подходящие значения под себя.

В тягово-динамическом расчете, можно также сразу посчитать оптимальное передаточное число каждой передачи для эффективного движения по треку с максимальной отдачей.

Но необходимо не только узнать передаточные числа, но также знать значение главной передачи и КПД трансмиссии, чтобы учесть все потери при расчетах и симуляциях. [29,32]

Данные коэффициенты (рисунок 31) помогают в процентном соотношении выбрать насколько вам необходимо воздействие внешних факторов, а именно:

- коэффициент мощности двигателя;
- аэродинамический коэффициент;
- дорожный коэффициент.

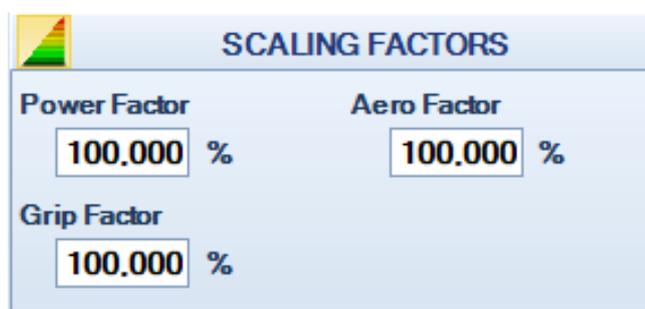


Рисунок 31 – Коэффициенты масштабирования

Ведь при езде на треке мы прекрасно понимаем, что нет нигде идеальной среды – при разном атмосферном давлении мы будем получать разные показатели мощности двигателя или же при движении по асфальту

мы не сможем добиться идеального лабораторного коэффициента сцепления, так же, как и прижимной силы. И с помощью подбора можно понять, насколько допускается сделать погрешность во время симуляции на те или иные факторы.

Но, пожалуй, стоит рассмотреть отдельно внешние факторы, которые способны в некотором роде повлиять на результат:

- качество покрытия дорожного полотна;
- погодные условия;
- температура асфальта;
- атмосферное давление.

Качество дорожного покрытия – от качества дорожного полотна зависит сцепление с дорогой, то есть наличие пыли, мелких камней это плохой результат подготовки трассы к дисциплине. В данном случае мы рассматривает асфальтовые гонки «Формулы Студент» или «Формулы 1».

Перед каждым заездом участника или перед каждым стартом, трассу очищают от загрязнений и повреждений. Были случаи, когда во время движения случались поломки и течи среди других участников соревнований. В тот момент судьи останавливали гонку для очистки трассы от технических жидкостей, чтобы минимизировать риск аварийной ситуации и не подвергать риску других участников соревнований.

Погодные условия – ряд совокупных метеорологических условий и атмосферных явлений. Нормальными условиями принято считать умеренные климатические показатели со скоростью ветра от 2 до 5 м/с и температурой окружающей среды от 25 °С до 28 °С с атмосферным давлением 760 мм рт. ст.

Основной помехой является дождь и ветер. При сильных осадках ухудшается видимость для пилота через визор и уменьшается коэффициент сцепления колес с дорогой. Но для борьбы с недостаточной видимостью уже имеется множество средств по типу «Антидождь» и «Антизапатин», которые помогают улучшить видимость пилоту при управлении автомобилем.

С боковым ветром иначе – ветер влияет на управляемость автомобилем. При сильном боковом ветре с массивным аэродинамическим обвесом усиливаются боковые силы, действующие на болид, и провоцируют увод болида со всеми вытекающими.

Далее, как всем известно, при повышении температуры большинство вещей расширяются из-за ускоренного движения молекул. При повышении температуры коэффициент сцепления шин возрастает и автомобиль становится более послушным и маневренным, но есть один существенный недостаток, износ шины становится более интенсивным, резина становится более пластичной и в совокупности может ускорить процесс износа протектора шины. Так же растет риск разрыва шины колеса, из-за возрастающего давления внутри покрышки. В совокупности с ускоренным износом требуется тщательный контроль за состоянием шин.

Но следует отметить тот факт, что шины аналогичным образом можно изнашивать путем неправильно выставленных углов установки колес. При неправильных углах развала и схождения колес возможно возникновение сил трения, при которых температура и износ изотрут рабочую часть шины в пятне контакта до неремонтопригодного состояния и повлекут за собой разрыв, что недопустимо для команды.

Атмосферное давление, как известно, является одним из основных параметров, влияющих на работу двигателя автомобиля. При низком атмосферном давлении – мощность двигателя снижается, в то время как при высоком давлении – мощность двигателя повышается. Это происходит из-за того, что двигатель работает за счет смеси топлива и воздуха. При низком атмосферном давлении количество воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, снижается, что в свою очередь снижает эффективность сгорания топлива. Кроме того, низкое давление в атмосфере затрудняет разрежение отработавших газов, что может привести к снижению мощности.

В случае высокого атмосферного давления количество воздуха, поступающего в двигатель, увеличивается, что более полно сжигает топливо

и увеличивает мощность. Кроме того, при высоком атмосферном давлении, высокотемпературные отработанные газы более эффективно выводятся из цилиндров двигателя.

Графически данные показатели отображены на рисунках 32-34.

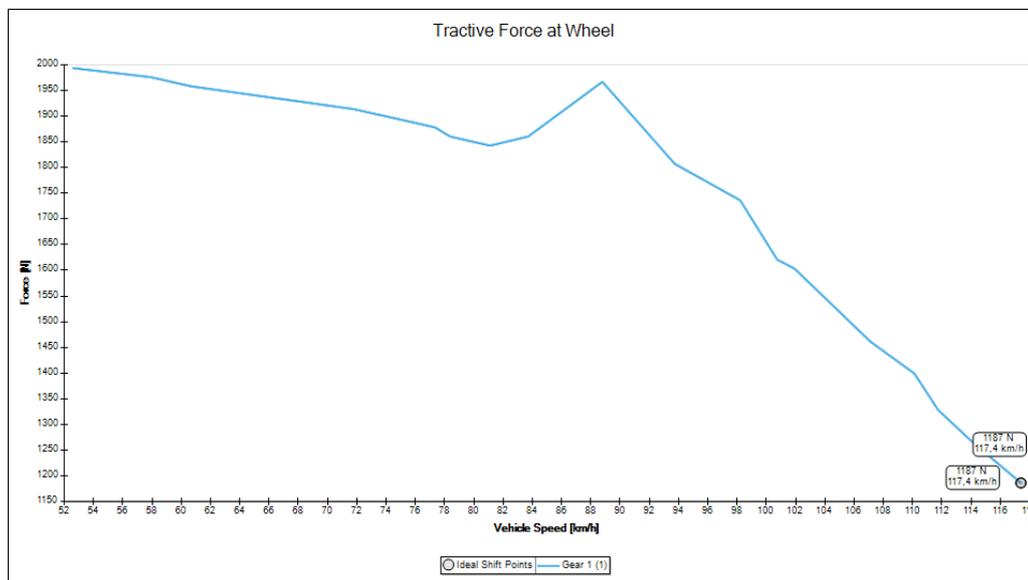


Рисунок 32 – График зависимости тяговых усилий на колесах

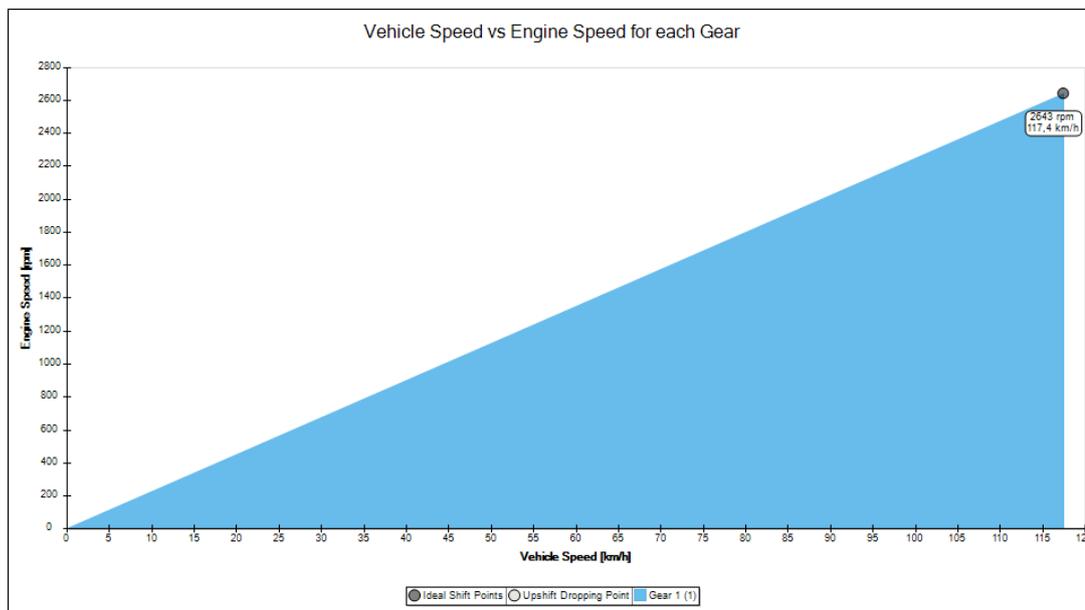


Рисунок 33 – График скорости автомобиля в зависимости от частоты вращения коленчатого вала на каждой передаче

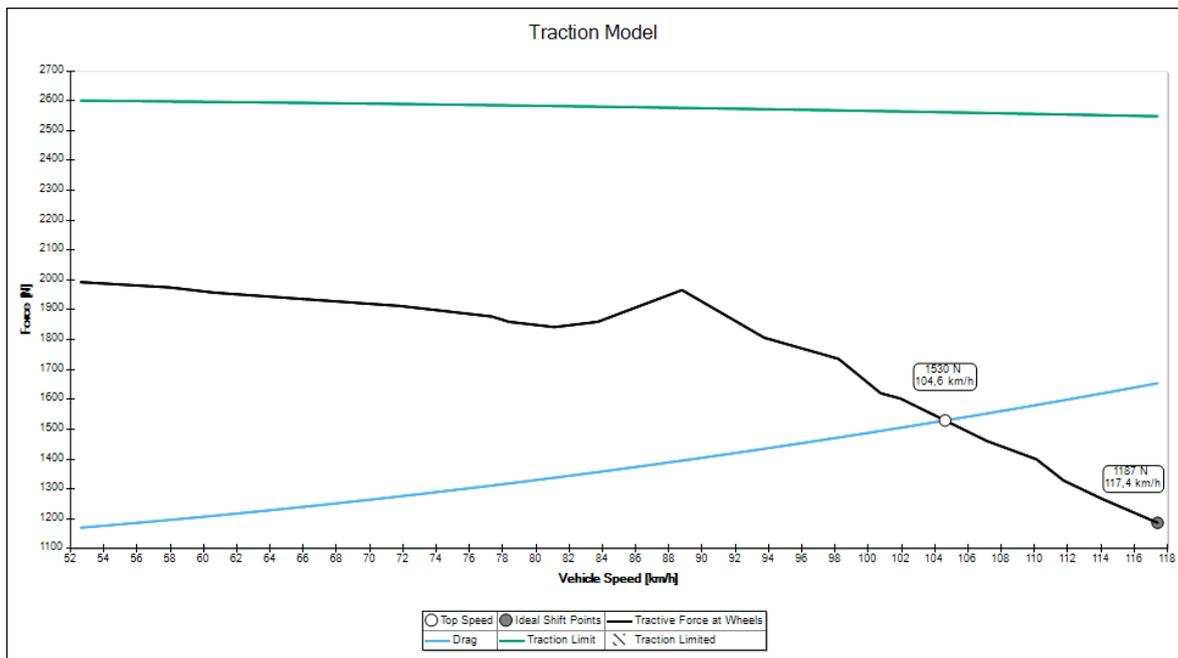


Рисунок 34 – График моделирования тяги автомобиля

4.2 Анализ данных моделирования при движении автомобиля по кругу с изменяемыми параметрами шины

В проекте «Формула Студент» Тольяттинской команды, есть выбор из нескольких видов шин:

- Hoosier 13” 200×75;
- Continental 13” 200×65 (тренировочные);
- Hoosier 10” 180×65.

На сегодняшний день во время разработки подвески автомобиля конструктор закладывает параметры шин под 13-дюймовый посадочный диаметр диска, и на это есть свой ряд причин:

- простота и надежность конструкции;
- обеспечение компоновочного пространства;
- применимость схожей размерности дисков (тренировочный вариант);
- широкий выбор комплектующих для данной размерной категории.

Так как параметры двигателя, КПП и аэродинамические характеристики уже заданы, начнем с ввода данных всех типов шин.

Определив на стенде поперечный и продольный коэффициент сцепления, запишем все данные в таблицу 6.

Стоит отметить, все данные и влияние на результат с изменением параметров шины будут производиться на болиде EScorpion 2021 года, поскольку подвеска данного автомобиля с небольшими модификациями может применяться как для колес 13” так и для 10”.

Таблица 6 – Коэффициенты сцепления различных типов шин

Давление, атм.	Коэффициенты сцепления	Нагрузка 90 кг
Hoosier 13” 200×75		
0,8	Ф _п	1,98
	Ф _{пр}	1,5
1,2	Ф _п	2,08
	Ф _{пр}	1,5
Continental 13” 200×65 (тренировочные);		
0,8	Ф _п	1,25
	Ф _{пр}	0,89
1,2	Ф _п	1,49
	Ф _{пр}	1,03
Hoosier 10” 160×60		
0,8	Ф _п	2,09
	Ф _{пр}	1,6
1,2	Ф _п	2,12
	Ф _{пр}	1,6

В таблице 6 отображены коэффициенты продольного и поперечного коэффициента сцепления под нагрузкой 90 кг. Это среднее значение приложенной массы болида с пилотом на каждое колесо.

В основном на соревнованиях использует давление в шинах с давлением 0,8 и 1,2 атмосфер.

Первое давление используется на дисциплине ускорение «Acceleration» на 75 метров для достижения максимального коэффициента сцепления и быстрого прогрева шин за счет увеличенного пятна контакта и исключения

пробуксовки ведущих колес при трогании в холодную погоду. Данный метод, своего рода небольшая хитрость в автоспорте, в котором мы не берем в расчет управляемость, поскольку движение в ускорении происходит только в прямом направлении.



Рисунок 35 – Замер скорости на шинах Hoosier 13”, с давлением 0,8 и 1,2 атмосфер

Как можно заметить на рисунке 35 из симуляции, результат одинаковый, поскольку в программе заложены одинаковые параметры. Но как показывает опыт соревнований Москвы 2021 года, в сентябре погода не способствует благоприятным условиям и давление 1,2 атмосферы крайне невыигрышное, так как происходят пробуксовки на старте и тем самым идет потеря времени.

Есть и превышение давления в 1,5 атмосферы, в дисциплине «Brake test» тормозных тестов, когда все колеса во время экстренного торможения должны заблокироваться одновременно. Здесь аналогично ускорению, управляемость в расчет не берем в силу того, что движение автомобиля происходит только в прямом направлении.

Рассмотрев выше несколько простых примеров, можно сделать вывод, что за счет изменения давления в колесе, можно подстроить один и тот же тип шин под различные задачи и достичь разных результатов.

Далее рассмотрим поведение автомобиля на дисциплине «Skidpad» восьмерка. Здесь нам важно время круга, а не отрезка длиной в 75 метров как на ускорении.

Во время движения болида по кругу диаметром 18,25 м с постоянно возрастающей скоростью увеличивается риск заноса и разворота автомобиля. Для того чтобы не допустить этого, пилоту необходимо контролировать автомобиль, но по своему опыту и опыту других опытных пилотов, можно сказать, что контролировать автомобиль и развивать более высокую скорость – задача непростая.

На восьмерке при хронометрируемом круге очень важно за первый круг набрать максимально допустимую скорость без сноса автомобиля для лучшего результата.

На рисунке 36 наглядно представлена разница в скоростях на дисциплине «Skidpad».

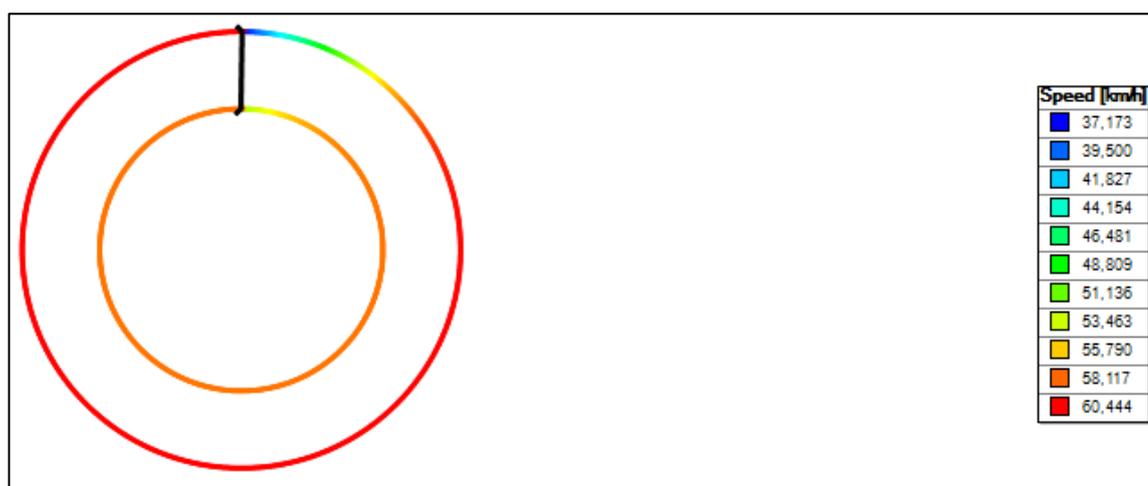


Рисунок 36 – Прогнозируемая скорость при симуляции «Skidpad» на шинах Hoosier 13” и 10”

Поскольку продольный и поперечный коэффициент сцепления у 10” выше, соответственно, и скорость в замкнутом круге на них можно получить больше – аналогично и со временем на круг (рисунок 37).

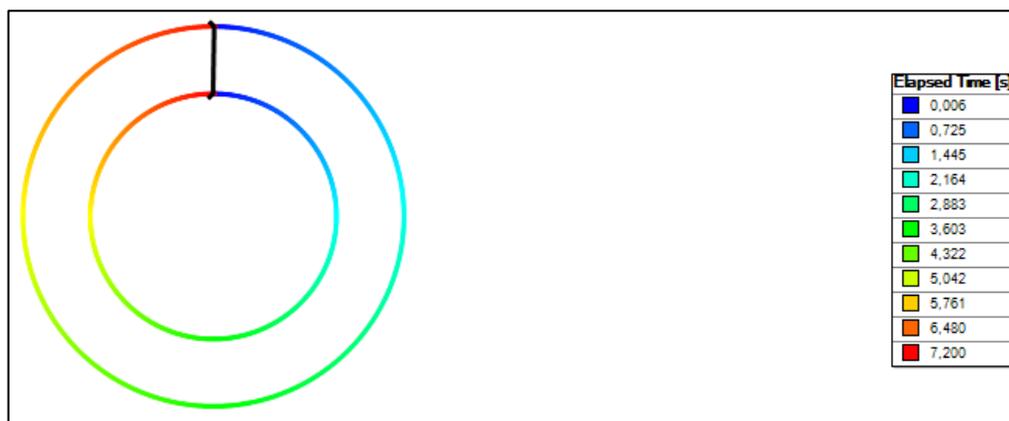


Рисунок 37 – Время, полученное при симуляции «Skidpad» на шинах Hoosier 13” и 10”

Во времени мы получаем разницу в 0,1 с, на шинах 10” время составляет 7,10 с на круг, а тем временем на 13” – 7,20 с. В данном случае малая разница в симуляции допустима, в реальных условиях разница может быть как в 0,2 с, так и в 0,5 с.

Отдельно стоит рассмотреть результат симуляций на тренировочных шинах Continental 13” (рисунки 38, 39). Так шины имеют статус «уставших», непригодных для соревнований, но для наглядности представления влияния характеристик шины на маневренность и результат подойдет.



Рисунок 38 – Прогнозируемая скорость при симуляции «Skidpad» на шинах Continental 13”



Рисунок 39 – Время, полученное при симуляции «Skidpad» на шинах Continental 13”

По рисункам 38 и 39 хорошо видна разница на круг в скорости и времени – 8,83 с и 49 км/ч, полученные на Continental 13”, против лучшего результата на Hoosier 10” – 7,10 с и 60,04 км/ч.

Далее рассмотрим поведение болида на трассах различных конфигураций. Были выбраны разные типы трасс – как с множеством прямых участков, так и с достаточно манёвренных с множеством резких поворотов.

Пожалуй, для анализа поведения болида, в первую очередь, возьмем трассу стандартной конфигурации – FSAE Endurance Germany 2012 – трасса зарубежного этапа, подготовленная, как для гонки на выносливость, так и для автокросса.

Симуляции проводятся только за счет изменений параметров шин, и сравнивать будем с максимальной скоростью и временем на круг (рисунки 40, 41).

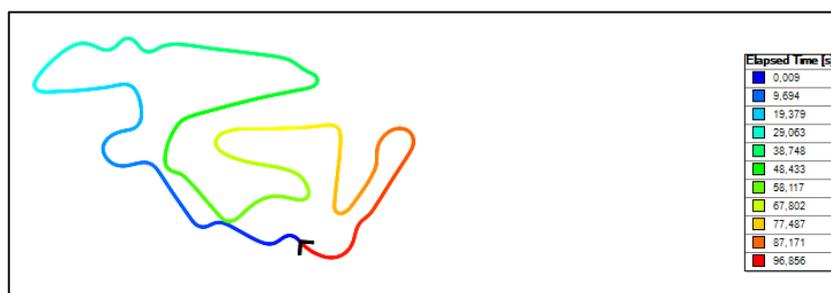


Рисунок 40 – Время полученное при симуляции на трассе FSAE Endurance Germany 2012 на шинах Hoosier 13” с давлением 0,8 атмосфер

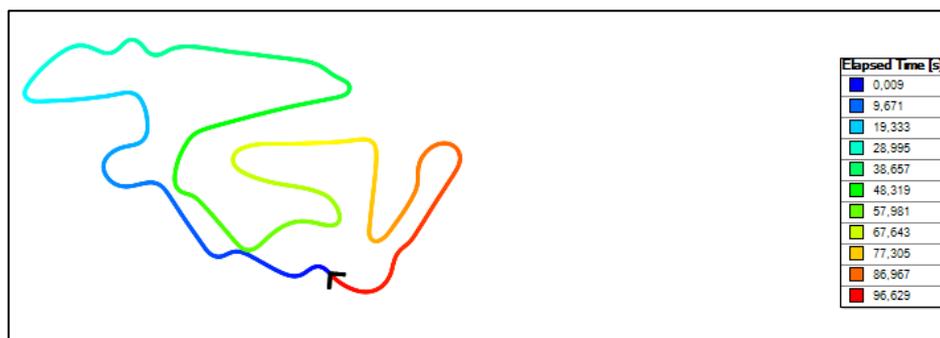


Рисунок 41 – Время, полученное при симуляции на трассе FSAE Endurance Germany 2012 на шинах Hoosier 13” с давлением 1,2 атмосфер

Рисунки 40 и 41 дают возможность увидеть отличия, как на одном типе шин, с одинаковыми размерными параметрами шины на трассе средней сложности разница во времени составляет примерно 0,2 с и примерно 0,2 м/с в скорости в пользу шин с давлением в 1,2 атмосфер.

При симуляции на шинах 10” Hoosier (рисунок 42) с разными значениями деления разница во времени и в скорости круга аналогична: во времени примерно 0,2 с и примерно 0,2 м/с в скорости в пользу шин с давлением в 1,2 атмосфер.

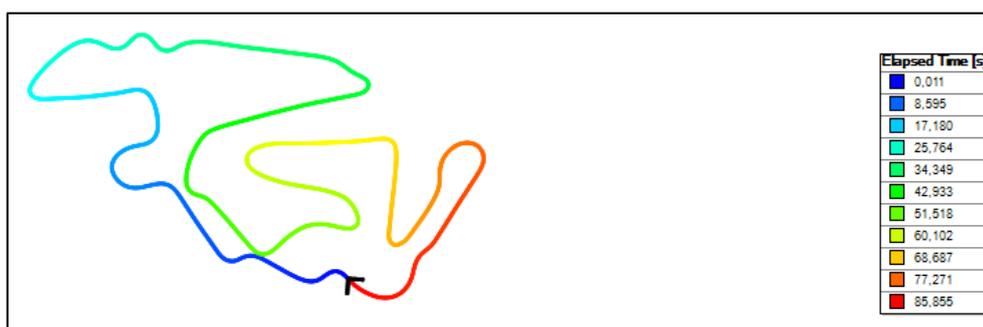


Рисунок 42 – Время, полученное при симуляции на трассе FSAE Endurance Germany 2012 на шинах Hoosier 10” с давлением 1,2 атмосфер

При сопоставлении наглядной проекции трасс по рисункам 41 и 42, видно, что по результатам максимальной скорости на более маневренной трассе преимущество у шин 10” Hoosier.

При анализе проекций скорости на трассе FSAE Endurance Germany 2012 (рисунки 43, 44) можно увидеть красные зоны. Красные зоны обозначают достижения максимальной скорости на данных участках трассы.



Рисунок 43 – Скорость движения болида на трассе FSAE Endurance Germany 2012 на шинах Hoosier 10” с давлением 1,2 атмосфер

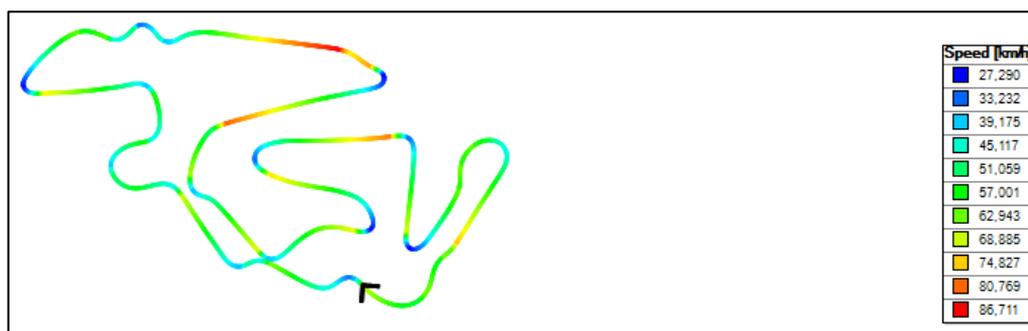


Рисунок 44 – Скорость движения на трассе FSAE Endurance Germany 2012 на шинах Hoosier 13” с давлением 1,2 атмосфер

Из рисунка 43 становится понятно, что благодаря размерности Hoosier 10”, болиду легче развить максимальную скорость на малых прямых участка трассы такой конфигурации, благодаря этому и идет выигрыш по времени и скорости. Ко всему этому добавляется поперечный коэффициент сцепления и малый угол увода шины при маневрах, что помогает в момент поворота лучше контролировать болид и проходить по траектории на большей скорости.

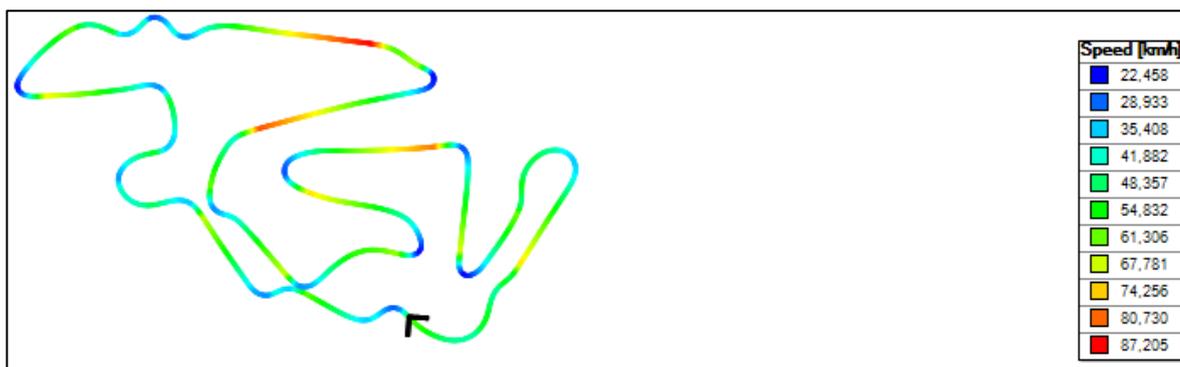


Рисунок 45 – Скорость движения на трассе FSAE Endurance Germany 2012 на шинах Continental 13” с давлением 1,2 атмосфер

Максимальная скорость болида на круге, представленная на рисунке 45, на шинах Continental 13” выше по сравнению с другими аналогами, но на проекции видно, что на маневрах скорость значительно ниже – как говорится, здесь играет роль значение поперечного коэффициента сцепления, которое на данном типе шин ниже, по сравнению с 13” Hoosier.

Тенденцией последних лет становится делать трассы с большим количеством поворотов и шпилек. В первую очередь это касается вопроса безопасности для самих студентов – не давать разгонять болиды до максимально возможных скоростей, поэтому важно знать или предугадать какой примерно конфигурации будет трасса и продумать настройки подвески и размерность колес заранее.

Возьмем трассу другой конфигурации, с Московского этапа Moscow Raceway. По сравнению с зарубежными аналогами, трасса имеет относительно небольшое количество поворотов и длинные прямые участки, и здесь уже заранее можно сказать, что 10” колеса не самый подходящий вариант для такой конфигурации.

На рисунке 46 показан лучший результат и по скорости, и по времени. Размер 13” больше, следовательно, есть возможность достичь большей скорости без изменения мощности болида.

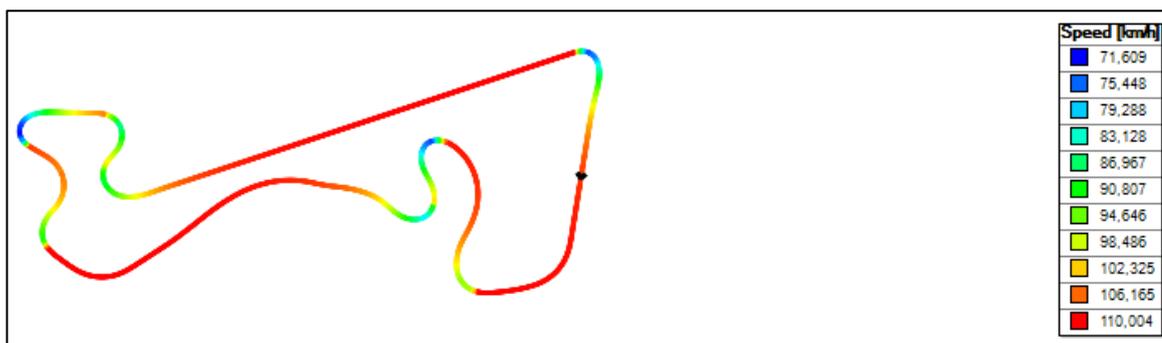


Рисунок 46 – Скорость движения на трассе Moscow Raceway на шинах Hoosier 13” с давлением 1,2 атмосфер

На 10” колесах болиду проще развить максимальную скорость (рисунок 47), и за счет повышенного поперечного коэффициента сцепления проходить повороты на данной трассе получается на скорости, приближенной к максимальной.

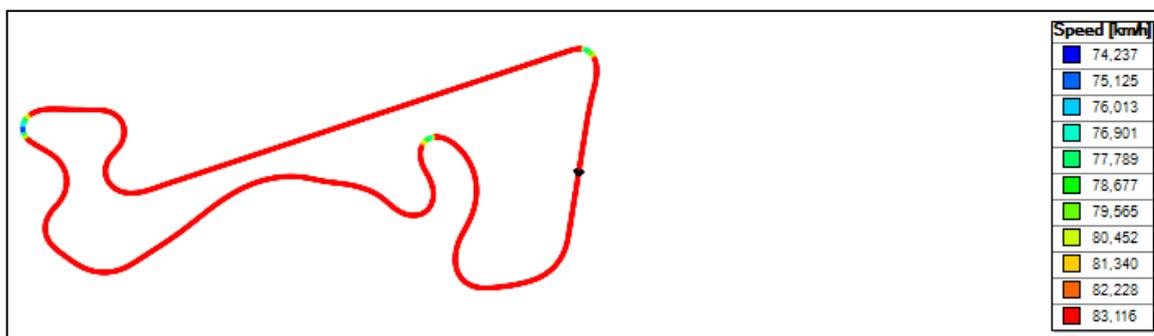


Рисунок 47 – Скорость движения на трассе Moscow Raceway на шинах Hoosier 10” с давлением 1,2 атмосфер

Но даже достижение максимальной скорости не помогает достигнуть эффективного результата, следовательно, есть риск потерять очки в дисциплине.

Будет справедливым рассмотреть сложную конфигурацию трассы, где результат будет действительно зависеть от эффективности подвески и грамотно подобранных шин.

Рассмотрим заключительный пример. В Германии конфигурация трасс автокросса и гонки на выносливость сложны и требуют пристального изучения перед заездами.

FSAE Autocross Germany 2012 трасса по меркам проекта «Формула Студент» достаточно сложная. Максимальная концентрация пилота за рулем и грамотное управление болидом предполагает отличный результат. На дисциплине «Автокросс» разрешается проехать два круга и результат лучшего идет в зачет.

Из вышеизложенного материала можно уже было заранее предсказать результат симуляции на рисунке 48. На трассе такой сложности, шины 10” Hoosier будут фаворитом, поскольку их преимущества по сравнению с аналогами, превосходят по параметрам, но уступают в размерности – и в данном случае это не недостаток, а преимущество.

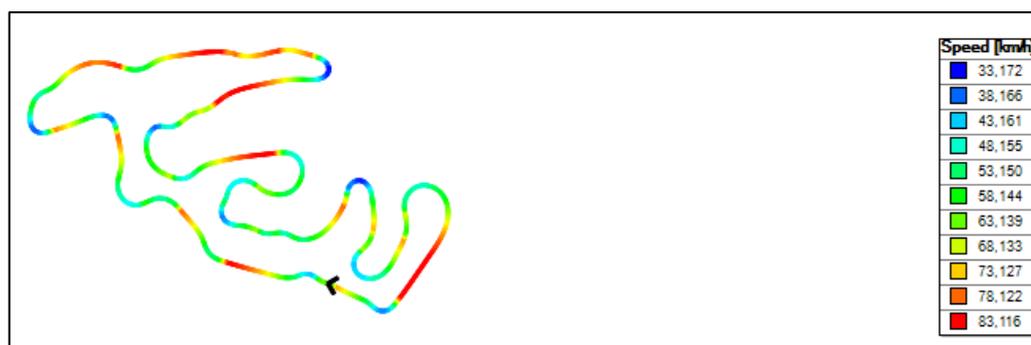


Рисунок 48 – Скорость движения на трассе FSAE Autocross Germany 2012 на шинах Hoosier 10” с давлением 1,2 атмосфер

Сравнение шин, представленное на рисунке 49, дает понимание, что 13” размерность колес не дает преимущество на манёвренных трассах.

Как говорил Клод Роуле: «Спроектировать раму по представленной инструкции в регламенте со своими изменениями может каждый, но вот разработать грамотную подвеску с правильно подобранными по характеристикам шинами способна не каждая команда».

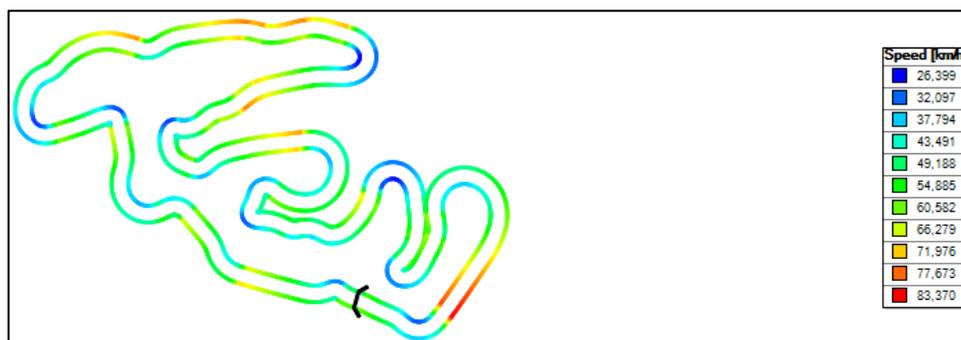


Рисунок 49 – Скорость движения на трассе FSAE Autocross Germany 2012 на шинах Hoosier 13” и Continental 13” с давлением 1,2 атмосфер

В качестве выводов по разделу можно отметить, что в последнее время наметилась тенденция на всех зарубежных этапах при разработке конфигурации трасс – сделать их более манёвренными, чтобы убедиться в профессиональности пилотов и наличию грамотного подхода к проектированию и подбору узлов и агрегатов для гоночного автомобиля формульного класса, в том числе, правильного расчета тяговой динамики автомобиля и подбора шин.

Анализ данных моделирования при движении автомобиля по кругу с изменяемыми параметрами шины позволяет оценить влияние этих параметров на управляемость и безопасность автомобиля. Одним из важных параметров является коэффициент сцепления шин с дорогой, который, в свою очередь, зависит от многих факторов, таких как протектор шин, давление, погодные условия и качество дорожного полотна.

Анализ данных моделирования показал, что изменение параметров шин может значительно влиять на управляемость автомобиля. Например, высокое давление в шинах может привести к потере сцепления и затрудненному управлению в поворотах на высокой скорости.

Полученные данные симуляций позволяют достичь большого преимущества, как на этапе разработки автомобиля, так и на этапе защиты его конструкции на соревнованиях.

Заключение

Шина является одним из наиболее важных элементов конструкции автомобиля, от которого зависит безопасность и комфорт при движении. На шину при движении воздействуют различные внутренние и внешние силы, которые могут привести к ее деформации, износу, разрыву или потере сцепления с дорогой.

Силы сцепления, возникающие в точке контакта шины с дорогой, оказывают наиболее существенное влияние на поведение автомобиля при маневре. Коэффициент сцепления зависит от многих факторов, включая состояние дорожного покрытия, тип и состояние шин, нагрузку на шину и погодные условия.

Некоторые команды в автоспорте могут дополнительно изменять характеристики шин, например, внося изменения в рисунок протектора или дополнительно усиливая боковины. Все эти изменения направлены на минимизацию сил, возникающих в пятне контакта шин с дорогой, и, следовательно, на улучшение управляемости автомобиля.

Проведенное исследование показало, что параметры шин оказывают значительное влияние на маневренность болида класса «Формула Студент». В частности, было выявлено, что увеличение жесткости боковины шины и уменьшение ее диаметра приводят к повышению управляемости и уменьшению времени прохождения трассы, а, например, высокое давление в шинах может привести к потере сцепления и затрудненному управлению в поворотах на высокой скорости.

Данное исследование может быть полезным для конструкторов и инженеров, работающих над созданием болидов класса «Формула Студент», а также для соревновательных команд, которые могут использовать полученные результаты для повышения своей эффективности и результативности в гонках.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Волкова Е. И., Шерстобитова О. О. Разработка пространственной рамы для гоночного болида Black Bullet // Точная наука. 2017. № 7. С. 18–20.
2. Горбунов А. С. Исследование видов деформации шин на стенде : дипломный проект. Тольятти : ТГУ, 2020. 98 с.
3. ГОСТ 17697-72. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1972. 24 с.
4. ГОСТ Р 52302-2004. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. М. : ИПК Изд-во стандартов, 2005. 27 с.
5. Износ шин и работа автомобиля / Науч.-исслед. ин-т информации автомобильной промышленности ; под ред. А. В. Запорожцева. М. : НИИНАвтопром, 1971. 52 с.
6. Кравец В. Н., Горынин Е. В. Законодательные и потребительские требования к автомобилям : учеб. пособие. Н. Новгород : НГТУ, 2000. 400 с.
7. Кравец В. Н. Теория автомобиля : учебное пособие. Н. Новгород : НГТУ, 2007. 368 с.
8. Лата В. Н. Основы моделирования управляемого движения автомобиля : учебное пособие. Тольятти : ТГУ, 2012. 60 с.
9. Лебедев В. А. Технология машиностроения : проектирование технологий изготовления изделий : учеб. пособие для вузов. Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. 361 с.
10. Основы конструкции автомобиля [Электронный ресурс]. URL: <http://ready-to-race.ru/2019/05/27/fsr19-t2/> (дата обращения: 11.01.2022).
11. Петров А. С. Исследование влияния площади пятна контакта шины с опорной поверхностью на коэффициент сцепления в поперечной плоскости : дипломный проект. Тольятти : ТГУ, 2018. 115 с.
12. Путин В. А. Автомобильные колеса с регулируемым давлением воздуха в шинах : учеб. пособие. Ч. 1. Челябинск : ЧПИ, 1974. 96 с.

13. Раймпель Й. Шасси автомобиля. М. : Машиностроение, 1983. 356 с.
14. Расчет тяговой динамики и топливной экономичности автомобиля : учеб. пособие : под ред. Л. А Черепанова. Тольятти : ТолПИ, 2001. 40 с.
15. Регламент международных соревнований 2021 Formula SAE® Rules. 110 с.
16. Сайт Formula SAE [Электронный ресурс]. URL: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/> (дата обращения 15.03.2023).
17. Сайт Formula SAE [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fsaeonline.com> (дата обращения 05.12.2022).
18. Сайт FSG [Электронный ресурс]. URL: <https://www.formulastudent.de/> (дата обращения 12.02.2023).
19. Сметанин В. М. Оптимизация конструкции подвески болида класса «Формула Студент» по критерию управляемости : дипломный проект. Тольятти : ТГУ, 2021. 89 с.
20. Стенд для испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://fasad-adelante.ru/stend-dlya-ispytaniya-shin-shiny/> (дата обращения: 30.06.2022).
21. Суслов А. Г. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов. М. : Машиностроение, 2007. 429 с.
22. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов ; под ред. М. Ф. Пашкевича. Минск : Новое знание, 2008. 477 с.
23. Хаммилл Д. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль. М. : Легион-Автодата, 2005. 96 с.
24. Харин Л. С. Анализ шин и методы их переработки // Инновационные научные исследования : сборник статей международной научно-практической конференции. Пенза : МЦНС, 2023. С. 101–104.
25. Шины для кольцевых гонок [Электронный ресурс] : URL: <https://fasad-adelante.ru/shiny-dlyaoltsevyhgonok/> (дата обращения 03.01.2023).
26. Clarke P. Technical introduction for the New Teams. 2014.
27. Dassault Systemes Solidworks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.todaymedicaldevelopments.com/news/medical-device-design->

dassault-system-solidworks-entrepreneurs-software-8515/ (дата обращения: 11.01.2023).

28. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics / Society of Automotive Engineers, Inc. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001.

29. Graham B. Performance Tuning in Theory and Four Strokes. Haynes Publishing Group, 1981. 252 p.

30. Haney P. The racing and high-performance tire. Springfield : TV Motorsport, 2003. 285 p.

31. ISO-7401-2003. Road vehicles. Lateral transient response test methods. Open-loop test methods.

32. Pacejka H. B. Tyre and Vehicle Dynamics. Elsevier Science & Technology, 2005. 631 p.

33. Training manual for the program «Optimum Lap» [Электронный ресурс]. URL: <https://optimumg.com/learn/> (дата обращения: 10.05.2023).