

## Глава 10. Угол увода

По многим причинам механика шины это не очень удобная тема. Эта тема затрагивает много неясностей, противоречий и коммерческих секретов. Теоретические и экспериментальные исследования в этой теме крайне сложны и дороги. Вероятно, это наиболее неисследованный аспект гонок на сегодняшний день, и часто этот аспект причина многих взлетов и падений. Находка в области моделирования или строения шины, даже если она была найдена случайным образом, может привести к доминированию одной шинной компании на протяжении нескольких лет, как например, сейчас это сложилось с BFGoodrich в автокроссе. Неудачный выбор покрышек гонщиком может привести к серьезным потерям, как в финансовом, так и в спортивном плане.

В этой главе мы исследуем физику сцепления шин несколько более глубоко, чем ранее. В главах 2,4 и 7 мы использовали простую модель сцепления с данными  $F$  и  $\mu W$ , где  $F$  – максимальная сила сцепления доступная для шины,  $\mu$  – постоянная величина, коэффициент сцепления, и  $W$  это мгновенная вертикальная нагрузка, или мгновенный вес колеса. Эта модель вполне подходит для грубых расчетов, для того чтобы интуитивно почувствовать поведение шины, но она становится слишком неточной для количественных расчетов. Например, для написания компьютерных программ моделирующих поведения автомобиля, инженерных изысканий в автомобилях или тонкой настройки автомобилей.

Я не шинный инженер. Но, как и всегда я пытаюсь привнести свежий взгляд на любую тему с точки зрения физики. Я могу написать вещи не очень точные или даже ошибочные, особенно в такой сложной теме как механика шин. Я приглашаю для обсуждения, исправлений тех, кто понимает в этой теме больше меня. Такое взаимодействие это часть работы с подобными вещами.

Эта глава названа «Угол сцепления»<sup>1</sup> Угол сцепления это величина, которая охватывает многие составляющие механики шины. Многие авторы называют эту величину «угол скольжения». Я считаю, такое название вводит в заблуждение, поскольку оно предполагает, что шина работает посредством скольжения. На самом деле явление гораздо сложнее. При нагрузках близких к максимальным на пятне контакта локально будет проявляться сцепление, локально скольжение. Максимальную равнодействующую сила, которую может предоставить шина на пороге сцепления, будет соответствовать состоянию, когда ещё проявлено сцепление, но шина уже почти срывается в скольжение. Кроме того у меня есть некоторые сложности с анализом информации о угле скольжения в литературе. Я представил эти сложности в этой главе, вероятно, без должного рассмотрения.

Шина это эластичное или деформируемое тело. Оно переносит силу от автомобиля к дороге посредством растяжения, сжатия и скручивания. Поэтому это очень сложный вид пружины с несколькими видами (режимами) деформации. Гипотетическая шина предполагает  $F \leq \mu W$  где  $\mu$  константа (см. главу 3), что верно для неэластичной шины. Любой, кто ездил на жестких шинах по льду знает, что неэластичные шины неконтролируемы, не только потому, что  $\mu$  будет очень маленькой, но и потому что летние шины на льду не будут ощутимо деформироваться.

Первый и наиболее явный вид деформации это радиальная деформация. Это деформация по радиусу колеса, т.е. по линии от центра к краю. Её хорошо видно как выпуклость на боковине возле пятна контакта, где резина касается земли. Силы радиального сжатия при движении будут перемещаются по окружности.

---

<sup>1</sup> В оригинале англ. “Grip/slip angle” угол сцепления/скольжения. На русском языке это называется угол бокового увода, дальше я буду применять термин угол увода.

Второй вид деформации это круговая деформация. Её можно заметить как морщинистость на боковинах драговых покрышек. Такие шины задумываются так чтобы сильно деформироваться в круговом направлении.

Третий вид деформации это осевая деформация. Это деформация которая старается оторвать колесо от неэластичного диска (обода) относительно машины вбок, т.е в поперечном направлении.

Последний и наиболее важный вид деформации для прохождения поворотов это торсионная деформация (деформация на скручивание). Эта деформация проявляется как разница в осевой деформации от одного конца пятна контакта к другому. По существу радиальная, круговая и осевая деформация дают полное представление о шине.

Давайте рассмотрим, как шина доставляет поперечное усилие от дороги к машине. Мы можем это хорошо представить при помощи стирательной резинки. Возьмите прямоугольную резинку, поставьте её на стол и представьте что это небольшой участок окружности шины. Давайте будем считать, что часть резинки, касающаяся стола это пятно контакта. Держите резинку за верхнюю часть и будем считать что ваша рука это обод колеса, который старается сжать, растянуть или скрутить шину.

Рассмотрим машину, двигающуюся с постоянной скоростью по прямой. Давайте повернем немного рулевое колесо вправо (скрутим верх резинки направо). В момент, когда мы начнем поворачивать обод (ваша рука) сзади пятна контакта будет толкать борт шины влево, в это же время спереди пятна контакта обод будет толкать боковину вправо. Такое явление, когда проявляется вместе и сжатие и растяжение называется «пара сил». Такая пара сил создает силу на скручивание во внутреннем каркасе шины возле обода. Это усилие передается на пятно контакта через эластичную боковину (или основную часть резинки). В результате поворота рулевого колеса обод скручивает пятно контакта по часовой стрелке.

Машина в это время всё ещё будет двигаться по прямой. Как мы собираемся объяснить наличие равнодействующей силы направленной вправо от дороги к пятну контакта. Эта равнодействующая сила должна быть. Согласно первому закону Ньютона только внешнее воздействие может заставить машину изменить направление.

Рассмотрим кусочек дороги под пятном контакта в момент начала поворота. Частички резины на левой стороне пятна контакта будут перемещаться относительно дороги немного быстрее, чем машина, а частички резины на правой стороне пятна будут перемещаться медленней. В результате левая сторона пятна будет цепляться немного меньше чем правая. Частички резины на левой стороне будут склонны к скольжению, а на правой стороне к сцеплению. Так левый край пятна контакта будет перемещаться вперед в результате скручивать пятно контакта по часовой стрелке. Скручивающая деформация станет скручивающим движением. И пока это движение будет продолжаться шина (и стирательная резинка) будут перемещаться направо.<sup>2</sup>

Лучшее сцепление на правой стороне пятна контакта создает равнодействующую силу направленную направо, которая передается через боковины автомобиля. Шасси машины начинает сдвигаться, вправо изменяя направление движения задних колес. Торсионная деформация также будет проявлена и на задних колесах. Задние колеса тоже будут испытывать «сдвиговое» движение.

---

<sup>2</sup> Откуда будет возникать равнодействующая сила и почему будет скользить внешняя (по отношению к повороту) сторона мне осталось непонятным /прим. переводчика.

Колесо (рука) поворачивается немного больше чем пятно контакта. Разница между углами поворота диска и пятна контакта это и есть угол увода. Все количественные величины механики шины, силы, коэффициенты трения итп условно выражаются в функции угла увода.

При стационарном движении, например в длинном повороте машина с недостаточной поворачиваемостью будет иметь больший угол увода спереди, а машина с избыточной поворачиваемостью больший угол увода сзади. Как контролировать углы статически установкой углов регулировки колес и динамически всеми управляющими колесами это тема для дальнейших исследований.

Больший угол увода сможет предоставить большее боковое ускорение только до некоторой точки. После этой точки больший угол сцепления даст меньшее ускорение. Эта точка и есть идеализированный предел сцепления, о котором мы говорили раньше. Так, задние шины количественно ведут себя как идеальные шины, которые начинают скользить после достижения предела сцепления.

Явление «гуляющего» движения пятна контакта нельзя назвать плавным или другими словами это движение дискретно. Отдельные части резины или скользят или цепляются с большой частотой, тысячи раз в секунду. При повороте на пределе частицы резины вибрируют на дороге создавая звук визжащей резины. За пределом сцепления визг переходит на более низкую частоту, сообщая, что точка наибольшей эффективности резины уже пройдена.

Можно ещё очень много сказать по этой теме и я надеюсь что мои первые попытки математического анализа угла сцепления и механики пятна контакта будут приведены ниже. Как бы то ни было, сейчас у нас есть концептуальная основа для лучшего моделирования в будущем.

Упомянув будущее, вкратце приведем планы, которые я хочу рассмотреть в этой книге в дальнейшем:

#### Физика шин

касается сцепления, угла увода, моделирования деформации. Этот аспект был рассмотрен в главах 2, 4, 6 и 10, и будет рассмотрен ещё в нескольких главах в дальнейшем;

#### Динамика автомобиля

касается управляемости, ходов подвески и движения автомобиля по трассе. Рассмотрено в главах 1, 4, 5 и 8 и будет рассматриваться далее;

#### Физика разгона

касается моделирования производительности двигателя и ускорения. Рассмотрено в главах 3, 6 и 9 и будет рассматриваться далее;

#### Компьютерное моделирование

касается создания работающей программы, которая учитывает всю физику. Это конечная цель этой книги, Тема начата в главе 8 и далее должна стать основной идеей книги.

Далее следует список глав написанных до сих пор:

1. Перераспределение веса
2. Сохранение сцепления резины с дорогой
3. Основные расчеты
4. Центробежной силы не существует.
5. Введение в гоночную траекторию
6. Скорость и мощность

7. Запас сцепления
8. Моделирование динамики машины в компьютерной программе (не переведено)
9. Прямые
10. Угол увода

Далее следует предполагаемый список того, что я хочу написать в ближайшем будущем (как говорится, список может измениться без уведомления):

Пружины и амортизаторы  
показывает подробную модель работы подвески (Предложено Бобом Моссо Bob Mosso);

Переходы  
показывает динамику автомобиля входящего или выходящего из поворота, шиканы, змейки;

Стабильность  
объясняет, почему машину может развернуть и другие моменты потери контроля над машиной;

Плавность  
подробно объясняет, что значит плавность;

Моделирование данных автомобиля  
В компьютерной программе, в нескольких главах;

Моделирование трассы  
В компьютерной программе, также в нескольких главах;

Я стараюсь сделать главы примерно одного объема, и если тема очень большая (тема «угол увода» определенно такая) я разбиваю её на несколько глав.