

**Основы аэродинамики:
стопами Кэрролла Смита.
Повесть о балансе. Книга 4**

Никита Котровский

Повести о Балансе

Никита Котровский

**Основы аэродинамики:
стопами Кэрролла Смита.
Повесть о балансе. Книга 4**

«Автор»

2024

Котровский Н.

Основы аэродинамики: стопами Кэрролла Смита. Повесть о балансе. Книга 4 / Н. Котровский — «Автор», 2024 — (Повести о Балансе)

Четвертая книга цикла "Повести о балансе" - "Основы аэродинамики: стопами Кэрролла Смита..." - рассказывает о важнейших аэродинамических принципах, на базе которых сегодня конструируется любой спортивный автомобиль. "Чтобы хоть как-то претендовать на подиум, современный пилот кольцевого болида необходимо должен знать основы аэродинамики; причем так же хорошо, как и в принципе основы динамики автомобиля", - постулирует американский гонщик, инженер и писатель Кэрролл Смит. Данная книга продолжает серию учебников по управлению гоночным автомобилем. Равно, как и "Колесо Жизни...", "Геометрия подвески..." и "Динамика подвески...", - она рассчитана прежде всего на начинающих пилотов, стремящихся реализовать себя в качестве автогонщиков.

© Котровский Н., 2024

© Автор, 2024

Никита Котровский

Основы аэродинамики: стопами Кэрролла Смита. Повесть о балансе. Книга 4

«Сглаживание» (вместо предисловия)

Само появление гоночных автомобилей способствовало осознанию важности аэродинамического сопротивления. Первые полвека, ну или чуть больше, это было все, что они осознавали в области аэродинамики. Снижение лобового сопротивления подразумевало уменьшение площади поперечного сечения автомобиля. А также "сглаживании" всего, что выступало за габариты спорткара. "Сглаживание" было интуитивным и, что говорится, "на глазок". Большая часть попыток придать обтекаемые формы кузову потерпели неудачу. Хотя болид и получался быстрее на прямой (чем, например, его формульный собрат с открытыми колесами), – он неизменно оказывался тяжелее, сохраняя все особенности поведения кузова в повороте. В 60-х годах мы поняли, что подъемная сила по меньшей мере так же важна, как и лобовое сопротивление. С тех пор берет начало нынешняя эра аэродинамики. Аэродинамические изыскания проделали долгий путь: от спойлеров – к различным клиновидным корпусам и крыльям. Наконец, чересчур коротко остановились на "пылесосе" Джима Холла, который тут же объявили вне закона. Его Chaparral 2J генерировал область низкого давления под днищем, искусственно высасывая из-под машины воздух с помощью двух огромных вентиляторов. Годами позже будущий конструктор McLaren F1 Гордон Марри использовал подобную систему в экклстоуновском Brabham BT46B под видом продвинутой системы охлаждения.

Сегодня любой пилот, который планирует выигрывать гонки, должен знать об аэродинамике болида ровно столько же, сколько ему необходимо знать и обо всех других областях динамики. Это вовсе не означает, что мы с вами должны стать специалистами в области аэродинамики. Нам в той же мере совершенно не обязательно уметь проектировать, скажем, коробку передач, – чтобы грамотно с ней обращаться. Однако весьма желательно понимать, что она делает, как это функционирует и каковы возможные компромиссы в ее работе. Для начала нам понадобится не самый короткий список жизненно важных определений.

Аэродинамический словарь. Начало

Жидкость. Словарная статья определяет жидкость как "текущее вещество, способное принимать форму своего резервуара". Иными словами, жидкость – это любое вещество, обладающее маленьким внутренним трением; то есть – легко поддающееся давлению. Все жидкости и все газы текучи при той амплитуде температуры и давления, которая нас интересует. Очевидно тогда, что воздух – тоже жидкость. И он должен неуклонно подчиняться всем законам гидромеханики. Тот факт, что внутреннее трение между частицами воздуха (которым мы дышим и благодаря которому приводим в движение наши гоночные автомобили) очень низкое, вовсе не означает, что его давление равно нулю, или что воздух будет "течь", как нам заблагорассудится. Воздух будет вести себя в соответствии с законами гидромеханики – и никак иначе. Поэтому нам предпочтительнее понимать эти законы. Хотя бы в общих чертах.

Статическое давление – это естественное давление окружающей среды. Оно выражается в единицах массы на единицу площади. Например, в фунтах на квадратный дюйм (psi).

Динамическое давление. Согласно закону Бернулли, оно определяется половиной произведения плотности жидкости на квадрат скорости потока. Строго говоря, нам это знать совсем необязательно. Динамическое давление жидкости пропорционально разнице между статическим давлением, существующим перед нами, плывущими по воде, – и локальным давлением воды в точке нашего тела, где проводится измерение. И это то, что нам желательно знать и

понимать! Динамическое давление прямо пропорционально локальному импульсу частиц жидкости; так сказать, движению капелек, взятому в моменте.

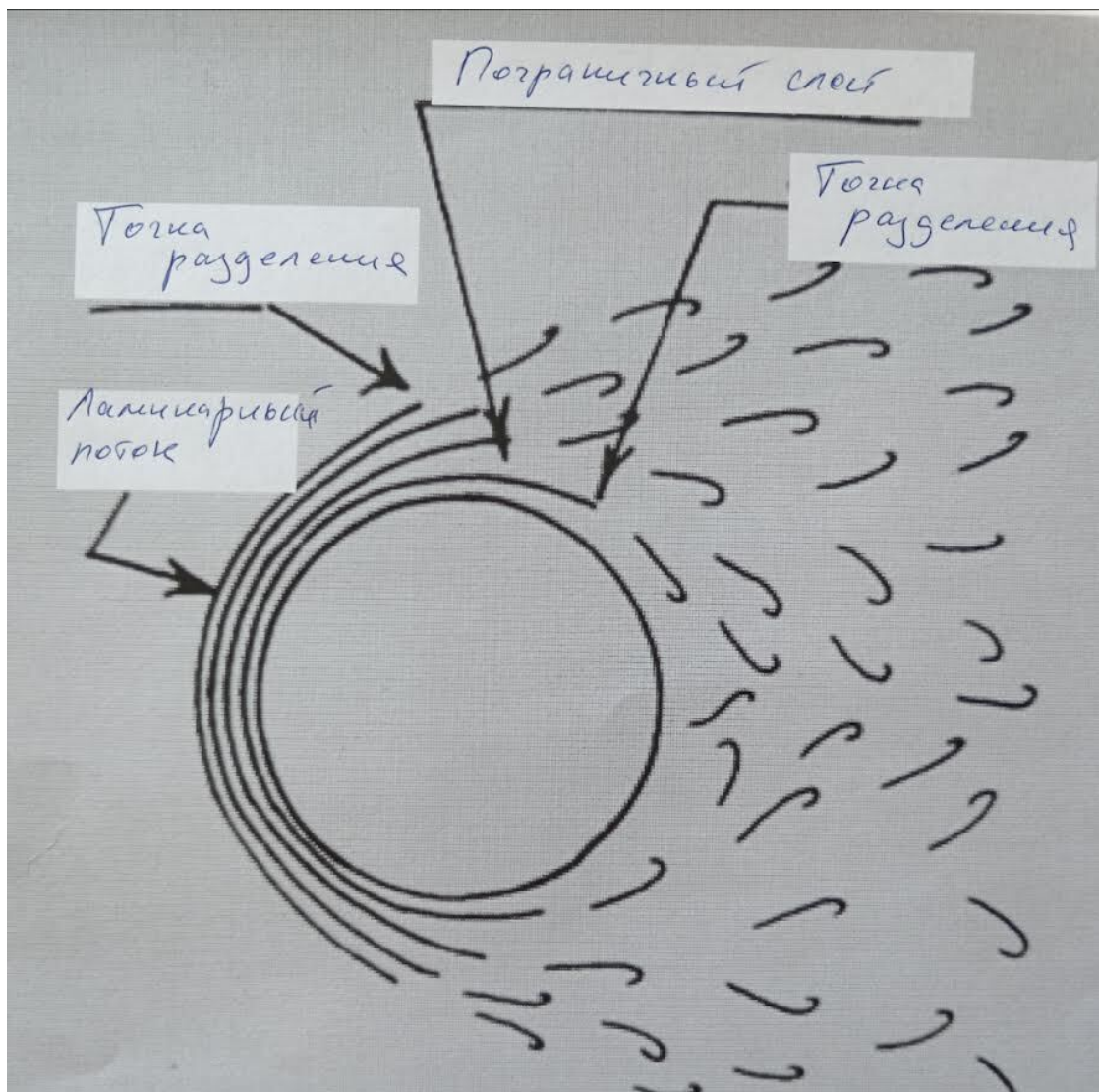
Линии обтекания. Если мы окрасим небольшую площадь поперечного сечения движущейся жидкости чем-то видимым (цветной дым в аэродинамической трубе или краситель в жидкости), то на боковой поверхности останется видна единственная линия. Она и называется линией обтекания и позволяет визуально изучать течение жидкости. Тела неправильно называют обтекаемыми, когда они имеют такую форму, что большая часть линий обтекания, проходящих вокруг тела, не нарушаются или не растворяются.

Ламинарный поток – такое состояние, при котором различные слои воздуха, или струи жидкости, не смешиваются друг с другом. При ламинарном течении все линии обтекания остаются практически параллельными. Относительные скорости различных слоев или линий обтекания неизменны, хотя скорость жидкости может изменяться. Ламинарный поток – это то, к чему мы всегда стремимся!

Турбулентный поток. Такое состояние, при котором различные слои жидкости или линии обтекания демонстрируют изменения скорости, смешиваются и закручиваются вихрями. Турбулентный поток – то, что нас тормозит!

Наглядный пример ламинарного и турбулентного течений – струйка благовонного дыма в неподвижном воздухе. Сначала шлейф будет подниматься плавно, а дым будет в виде линий обтекания. Рано или поздно шлейф "устает", начинает вздрагивать; появляется турбулентность, – и тогда линии обтекания пересекаются и разрушаются.

Пограничный слой (или – слой трения): сравнительно тонкий слой жидкости или газа, непосредственно соприкасающийся с поверхностью тела, которое движется сквозь жидкость или газ. Трение между телом и жидкостью замедляет поток относительно его внешнего значения до фактического нуля на поверхности тела. Течение в слое трения бывает как ламинарным, так и турбулентным; при этом сам слой может быть или тонким, или плотным. В передней части обтекаемого тела жидкость смещается в сторону, пограничный слой – тонкий, а поток – ламинарный. Внутреннее трение жидкости, а также трение между жидкостью и телом рассеивают часть энергии. По мере движения потока вдоль тела, пограничный слой обычно уплотняется и становится нестабильным. Если он чересчур плотный, другими словами – турбулентный, или если он попадает в область повышенного давления, – то слой трения отделяется от тела. Типичный пример – обтекание цилиндра потоком, как показано на рисунке 1. В передней части цилиндра давление максимально. По мере того, как пограничный слой обтекает переднюю часть цилиндра по направлению к верхней и нижней его частям, давление непрерывно падает. Однако за вершинами цилиндра оно снова возрастает. И очень быстро! Слой трения не в силах совладать с этой "борьбой на вершине". Он отделяется от тела на гребнях (или сразу за ними), создавая хаотичный поток с высоким сопротивлением.



Перепад давления – это локальное давление в данной точке на поверхности тела минус статическое давление перед телом. Возвращаю читателя к определениям динамического и статического давлений. Изменение перепада давления вдоль поверхности тела называется градиентом давления. Положительный градиент давления, при котором перепад увеличивается по направлению потока, называется неблагоприятным градиентом, способным привести к разделению потока.

Общее давление и закон постоянного давления. Бернулли уверяет нас, что в идеальных условиях сумма статического и динамического давлений будет оставаться постоянной. Это объясняет возникновение сопротивления, вызванного встречным напором. Как скорость, так и локальное давление частиц, приближающихся к телу, уменьшаются. Поэтому статическое давление непосредственно перед движущимся телом увеличивается. Как в случае "носовой волны": жидкость словно бы готовится убраться с пути. Идеальный случай – когда в кормовой части кузова происходит соответствующий "обмен частиц" между статическим и динамическим давлением. В таком случае существовало бы равновесие, – и не было бы сопротивления, вызванного давлением. В реальном мире, где мы с вами изволим гоняться, существуют и вязкое трение, и замедление с последующим резким срывом пограничного слоя. Поэтому схема обтекания движущегося объекта, мягко говоря, несколько отлична от идеала. Замедление частиц жидкости на задней кромке кузова с последующим восстановлением давления – это отнюдь не полная картина мира. Результат увеличения статического давления перед кузовом

и уменьшения давления на его задней кромке – и есть сопротивление, вызванное перепадом давления. Вот теперь картина вырисовывается!

Разделение потока начинается в пограничном слое и приводит к дроблению потока в полном объеме. Проще говоря, поток жидкости не способен следовать форме тела (кузова). Отделение пограничного слоя происходит именно тогда, когда силы трения между его пластами становятся слишком велики, чтобы слой мог удержаться на кузове. Такое случается при слишком крутом неблагоприятном градиенте давления, чересчур сильной турбулентности внутри слоя, быстром изменении формы тела. Наконец, – когда пограничный слой "натыкается" на швы или выступы кузова. Бывает, что отделившийся слой трения снова воссоединяется в той или иной точке. Ниже по течению от места отрыва.

Примерами срыва объемного потока являются сваливание на крыло, а также большой турбулентный след в хвостовой части тупоконечных тел. Всякий раз, когда поток разделяется, мгновенно происходит ощутимое увеличение лобового сопротивления. В случае с крыльями самолета, отметим, сваливание приводит еще и к резкому снижению подъемной силы.

Присоединенный поток – явление, которое противоположно отделенному потоку. По понятным причинам, оно более предпочтительно. Поток жидкости может быть турбулентным, но оставаться присоединенным. Фактически, ламинарный слой трения при неблагоприятном градиенте давления может отделиться быстрее, чем турбулентный пограничный слой.

Аэродинамический словарь. Продолжение

Сопротивление, или "дрэг", – встречная сила, которая тормозит любое тело, движущееся в жидкости или газе. Ее действие всегда параллельно направлению движения и противоположно ему. Лобовое сопротивление обусловлено передачей импульса между телом и жидкостью. Оно вызвано смещением жидкости телом и трением, возникающим между ними.

Сопротивление давлению, или Сопротивление профилю, – это сила, вызванная перемещением жидкости вдоль тела, движущегося сквозь эту жидкость. Жидкость, сопротивляющаяся движению тела, создает положительное давление, так скажем, на переднем крае, тем самым замедляя движение тела. По мере того, как поток жидкости проходит через переднюю кромку, давление быстро снижается. На некоторое время оно может даже стать отрицательным! А затем снова медленно увеличивается – до тех пор, пока не произойдет разделение потока. Давление в области разделенного потока будет отрицательным. Оно будет влиять на поступательное движение тела с той же силой, с какой на него воздействует высокое давление на передней кромке. Сумма двух тормозящих сил – и есть искомое лобовое сопротивление, вызванное давлением. Это – главный компонент общего лобового сопротивления для необтекаемых, или полуобтекаемых, тел. Ради обсуждения таких форм мы с вами и затеяли все это. Ну, за исключением, пожалуй, наших крыльев, которые, как мы надеемся, будут иметь более эффективные формы! В случае обтекаемых кузовов сопротивление трению о поверхность обычно больше, чем сопротивление давлению. Отметим, что даже в случае максимально обтекаемой формы мы не можем полностью устранить сопротивление давлению.

Индукцированное сопротивление – сила, создаваемая подъемной поверхностью. Крыло, чтобы создать подъемную силу, обязательно придаст импульс жидкости или газу. Естественно, импульс проявляет себя как торможение, "дрэг". Подъемная сила отнюдь не самодостаточна: чем она больше, тем сильнее индукцированное сопротивление. Мы можем полагаться лишь на то, что за счет исключительного дизайна подъемной поверхности нам удастся минимизировать сопротивление на единицу подъемной силы. Наиболее эффективный способ минимизировать индукцированное лобовое сопротивление крыла – увеличить его размах. Сама природа позаботилась об этом, наделив всех своих парящих птиц размашистым крылом! Нашим санкционирующим органам также не глупо прислушаться к матушке-Природе. Ибо они постановили, что крылья гоночных автомобилей должны быть небольшого размаха.

Паразитное сопротивление. Его создает все, без чего мы не можем обойтись, но что "вылезает" за габариты кузова. Самые всеразличные выступы на корпусе: крепежные детали, теплообменники, зеркала, воздухозаборники и так далее, и тому подобное. Во многих исследованиях сопротивление трению о поверхность кузова рассматривается как часть паразитного сопротивления. Мы же разделим эти два понятия.

Сопротивление поверхностному трению – сила, вызванная трением между поверхностью тела и жидкостью, через которую оно движется. Величина сопротивления зависит от качества поверхности и ее площади. Как ни странно, сопротивление при трении о поверхность не так уж важно в случае гоночного автомобиля. Тем не менее, оно есть и с этим не трудно разобраться.

Аэродинамический словарь. Финал

Импульс равен произведению массы тела на его скорость. Таким образом, чем тяжелее объект и чем быстрее он движется, тем большее количество энергии он способен высвободить, если его остановить. Тело постоянно трансформирует импульс на жидкость (или газ), сквозь которую движется. Передача происходит в силу смещения газа, необходимого для прохождения тела, и за счет тепла трения между телом и жидкостью. Импульс в моменте равен сопротивлению, "дрэг". Для того чтобы тело продолжало двигаться в жидкости с постоянной скоростью, потерянный импульс должен непрерывно восполняться источником энергии. Очевидно, что для ускорения тела источник энергии должен создавать большую тягу, чем теряется при передаче импульса. В противном случае самолет будет терять скорость и высоту; а искомый нами болид начнет замедляться. Импульс передается от тела к жидкости посредством:

1. Перемещения определенного объема жидкости в направлении движения и еще большего количества жидкости в перпендикулярном направлении.
2. Приведения определенного объема жидкости в турбулентное или неравномерное движение.
3. Удержания определенного объема жидкости в системе постоянных завихрений.
4. Выделения тепла в результате трения между жидкостью и телом; а также между слоями газа, движущимися с различными относительными скоростями.

Вязкость – сопротивление на молекулярном уровне. Частицы жидкости проявляют вязкость к перемещению относительно друг друга и относительно поверхности тела. Наиболее ярко вязкость проявляет себя в сопротивлении поверхностному трению – как тангенциальная (касательная) сила, – в тот момент, когда газ минует поверхность тела. Тангенциальная сила сопротивляется поверхностному трению. Она возрастает по мере увеличения вязкости. С точки зрения наших конкретных целей, вязкость воздуха не зависит от давления. Хотя она и уменьшается с повышением температуры, мы будем считать ее постоянной.

Сжимаемость – свойство газообразной жидкости уменьшаться в объеме при увеличении статического давления. Общеизвестно, что жидкости не поддаются сжатию. В отличие от газов. Поэтому-то пузырьки в тормозной системе и "размягчают" педаль тормоза. Скорости даже в первой Формуле далеки от несжимаемого воздушного потока. Так что мы не станем беспокоиться по этому поводу.

Число Рейнольдса – безразмерная величина, которая изменяется в зависимости от скорости воздуха и размера движущегося тела и обратно пропорциональна плотности и вязкости жидкости. Основная заслуга числа Рейнольдса в том, что оно позволяет специалистам по гидромеханике спрогнозировать полномасштабные результаты модельных испытаний. С точки зрения нашей главной темы, оно имеет весьма ограниченное применение.

Коэффициент лобового сопротивления – безразмерная величина, используемая для сравнения сил лобового сопротивления тел различной формы. Сокращенно обозначается как CD (Coefficient of Drag) и получается путем измерения силы сопротивления, деленной на динамическое давление в эталонной площади.

Коэффициент подъемной силы – еще одна безразмерная величина. Она позволяет сравнивать подъемные силы, генерируемые различными формами. Обычно этот показатель сокращенно обозначается как CI (Coefficient of Lift). Он получается путем измерения подъемной силы и деления ее на динамическое давление и контрольную площадь.

Для достижения своих целей мы разделим изучение основ аэродинамики спортивного автомобиля на три отдельные, но взаимосвязанные области:

1. Аэродинамическое сопротивление, или "дрэг".
2. Аэродинамическая прижимная сила.
3. Аэродинамическая устойчивость, или – искомый нами Баланс!

Аэродинамическое сопротивление

На скоростях свыше 120 км/ч аэродинамическое сопротивление становится криминальным. Оно явственно ограничивает динамику нашего болида на прямой. Очевидно, что снижение лобового сопротивления приведет к увеличению максимальной скорости при той же мощности двигателя. Не столь очевидный, но еще более важный фактор, – то, что снижение аэродинамического сопротивления дает определенный прирост мощности при разгоне до "максималки". Чем больше избыток мощности, тем выше скорость разгона. И тем меньше, в итоге, время нашего круга! Предоставим слово Кэрроллу Смит:

"Основная формула лобового сопротивления автомобиля выглядит так:

Сила лобового сопротивления равна коэффициенту сопротивления, умноженному на квадрат лобовой поверхности, помноженному на квадрат скорости болида и деленному на константу 391.

Предадим реалистичность нашей формуле. Допустим, что речь идет о болиде Формулы 5000, который подлетает к финишу дальней прямой на трассе в Риверсайде. Коэффициент лобового сопротивления равен 0,65; площадь лобовой поверхности составляет 17 квадратных футов, а скорость автомобиля – 180 миль в час:

Сила сопротивления будет равна 0,65 умножить на квадрат 17-ти, помножить на квадрат 180 и разделить на 391. Итого – 915.

К сожалению, 915 фунтов сопротивления для нас мало что означают. Необходимо перевести единицы веса лобового сопротивления в лошадиные силы, необходимые для его преодоления. И тогда наше число обретет смысл!

Мощность сопротивления равняется произведению коэффициента лобового сопротивления на фронтальную площадь и на скорость в третьей степени, разделенному на 146600.

Используя те же вводные данные, мы получаем, что мощность лобового сопротивления в нашем случае равна 439 лошадиных сил.

Как будто бы выходит, что, если мощность двигателя 560 лошадиных сил, то у нас есть еще 121 "лошадка" в запасе, дабы разогнаться до 180 миль в час. Однако мы должны еще учесть целый ворох подспудных потерь: на трансмиссионные трения; на инерцию работы двигателя, ходовой части; а также на сопротивление качению шин. Пять процентов мощности мы отдадим работе трансмиссии; 6 процентов – инерционному вращению различных узлов и агрегатов. Наконец, минимум 60 лошадиных сил "сожрут" шины, сопротивляясь качению. Сложив все вместе и вычтя из доступного, мы получим те же 439 лошадиных сил. А значит – мы уже достигли теоретической максимальной скорости автомобиля!"

Оставим американского инженера с его многэтажными формулами в покое. Сами же немного почертим. График зависимости скорости движения нашего автомобиля от мощности лобового сопротивления выглядит как почти вертикально вздымающаяся кривая, показанная на рисунке 2 сплошной линией. Далее. График наглядно показывает, с чем мы имеем дело. Допустим, что нам удастся уменьшить либо лобовую поверхность автомобиля, либо коэффициент лобового сопротивления на 10 процентов. В таком случае кривая взаимоотношений скорости нашего болида и лобового сопротивления будет пунктирной линией. Если же мы сумеем

уменьшить на 10 процентов и то, и другое, – то кривая зависимости станет точечной. Очевидно, что ни то, ни другое не представляет собой существенного количественного улучшения. Это просто связано с тем, что мощность лобового сопротивления увеличивается, в первую голову, как коэффициент лобового сопротивления плюс площадь лобовой поверхности. Затем в качестве третьей силы подключается увеличение дорожной скорости болида. Арифметика, таким образом, проста. Чтобы увеличить максимальную скорость, скажем, на 5 процентов, нам придется, во-первых, уменьшить лобовую площадь на те же 5 процентов. Далее, во-вторых, – улучшить коэффициент лобового сопротивления на 5 процентов или, в-третьих, увеличить мощность двигателя примерно на 15 процентов! Крайне маловероятно, что мы сумеем легитимно увеличить мощность гоночного двигателя на 15%, не правда ли?

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.