

Глава 15. Неровности на дороге.

Брайан Бекман, доктор наук,
Джерри Кач⁴

В этой главе мы рассмотрим как эффект от проезда неровностей будет меняться в зависимости от скорости. Любой знает что неровности будут проходиться, с бОльшим эффектом на большой скорости. Толчок, который будет заметным на скорости 80 км/ч, будет очень болезненным на скорости 160 км/ч. А что насчет скорости 320 км/ч? Будет ли толчок лишь немного более жестким или он будет настолько жестким, что Вы выбьете себе зубы или, что ещё хуже, потеряете управление. Могут ли неровности быть ограничивающим фактором для скорости поворота? В аэродинамике автомобиля может неровность быть причиной неожиданной потери прижимной силы или сцепления? Для анализа таких вещей нам нужно понимать изменение влияния неровностей в зависимости от скорости

Давайте потратим немного времени на то, чтобы объяснить, откуда появилась эта тема. В частности, зачем любителю беспокоится о неровностях на скорости 320 км/ч? В автокроссе скорости низкие, чтобы дать возможность любому безопасно ездить на пределе. Если кого-нибудь развернет в автокроссе, то в этом не будет ничего страшного. Низкие скорости ещё означают, что не очень большие кочки не будут играть большой роли. На реальной гоночной трассе скорости будут выше настолько, что на кочках можно потерять управление. Но скорости там далеко не всегда намного выше и редко достигают 300 км/ч. Можно указать только два места, где движение с высокой скоростью будет занимать много времени это: скоростные овалы и гонки open-road. Скоростные овалы это специализированные гонки, в которых редко встречаются любители. Поэтому сфокусируемся на любителях, на гонках open-road.

В главе 11 мы рассмотрели торможение с 320 км/ч на гонке Silver State Challenge (SSC) в Неваде. Мой соавтор Джерри Кач и я только что были на гонках Nevada Open Road Challenge - 2000 (NORC).

Это майская версия SSC в Неваде, а само SSC проходит в сентябре. Во всех остальных аспектах NORC и SSC это одно и то же. Для большинства из 230 участвовавших автомобилей это гонки на скорость и гонки время-скорость-дистанция (TSD). В каждом из шестнадцати TSD классов побеждает автомобиль, который проехал, как можно более близко к требуемой скорости. Классы TSD разделенные через каждые 5м/ч (8км/ч) от 95 до 170 м/ч включительно (150-270км/ч), с отрезками с низкой и с высокой скоростью введенных исходя из соображений безопасности. Ещё есть класс без ограничений, в котором побеждает быстрееший автомобиль. В этом году в майской гонке победитель класса без ограничений проехал со средней скоростью 333 км/ч дистанцию в 144 км. Максимальная скорость достигала 365 км/ч. Джерри и я ездили в классе 210 км/ч с максимальной скоростью 265 км/ч.

Гонки SSC и NORC представляют собой заезд на 144 км по хайвэю 318 из Ланд в Хико в Неваде, проходящему примерно параллельно кратчайшему пути из Твин Фоллс в Лас Вегас. Направление заездов с севера на юг по дороге в удаленной пустыне, которая невероятно красива. Здесь находишься постоянно под впечатлением, что если задержишься здесь, то непременно умрешь в течение нескольких часов от жары и обезвоживания. Она великолепна!

Гонки на трассе 318 проходят без перерывов с 1988 года. В 1990 и 1991 Марк Торнтон, мой знакомый автокроссер сделал из своего Corvette Super Stock 1986г. Nevada-car. Марк и я владели почти одинаковыми SS, и мы часто менялись машинами на автокроссах. Так случилось, что эти машины были почти такими же как известный желтый SS Роджера

⁴ Brian Beckman PhD, and Jerry Kuch

Джонсона, многократного чемпиона, который если я не ошибаюсь, до сих пор ездит на SS. Я знаю, что Роджер ездил за рулем моей машины. Я не знаю водил ли он когда-нибудь машину Марка, но я делал это много раз.

Марк, ныне покойный, был немного плохим парнем, и шоссе 318 было как раз тем местом, которое его привлекало. Легенды гласили, что соревнования организовывались теми, кто участвовал в старых нелегальных заездах. Конечно, NORC и SCC проводились со всеми необходимыми санкциями и полностью легально, несмотря на то, что трассу приходится закрывать для общего пользования и использовать только для гонок.

Неудовлетворившись TSD классами Марк решил переделать свою черную машину для класса без ограничений. Я был с Марком, когда он загонял свою машину Дику Гулдстранду, для доработки подвески, по усмотрению Дика. Я был с ним, когда машина поехала к Джону Лингенфелтеру для доработки мотора необходимой для езды со скоростью 320 км/ч. Я встретился с Марком в Лас-Вегасе и помогал ему готовить машину к гонкам. Я сделал несколько перегазовок для прогрева резины и с мощностью около 600 л.с. я скажу, что машина была очень быстра. Вы можете просмотреть характеристики этой машины здесь <http://www.angelfire.com/wa/brianbec/foober.htm>.

К несчастью, в день гонки на машине загорелось масло на первой шестимильной прямой по причине того что головки были слишком близко к масляному фильтру. Обязательная система пожаротушения сохранила Марка и его машину. И я помню, как мы возвращали машину домой. Через год Марк выиграл Триатлон мотоспорта, который проводился журналом о хотродах и если я не ошибаюсь, повторил свой успех в 92. Я говорю, что эта машина была на обложке журнала где-то в те два года, но я это не проверял.

Я поехал в штат Вашингтон и потерял связь с Марком, который погиб в аварии не связанной с мотоспортом. Марк не был однообразным, и даже его враги говорят что он был по-настоящему выдающимся пилотом с обаятельным, веселым и сложным характером. Многие автокроссеры которые ездят до сих пор его помнят.

По глупой случайности я наткнулся на продажу Nevada Car Марка во Флориде в 1999. Я был в Сиетле, слишком далеко, чтоб совершить сделку, но это была судьба. Я ездил много раз на этой машине, собирал её, был другом её создателя. Она должна была достаться мне, не так ли? Более того я ДОЛЖЕН был опять поехать на ней в Неваду, не так ли?

Я купил машину и начал комплексную работу по её подготовке к NORC. Никто не подумает ездить на машине со скоростью 320 км/ч без полной проверки. Энергия машины на 320 км/ч в четыре раза больше чем её энергия на скорости 160 км/ч и в 16 раз больше чем на скорости 80 км/ч. Более того, машина активно участвовала в гонках open-road в эти годы, и было самое время приостановиться и всё проверить. Никто не захочет, чтобы заклинил мотор или сломался элемент подвески на скорости 180 км/ч, не говоря о 320 км/ч.

С двумя месяцами запаса стало очевидно, что машина не будет готова вовремя. От греха подальше я попросил механиков не торопиться, если они не уверены что всё будет сделано, верно. Стандарты безопасности для работ для высокоскоростных машин должны быть значительно выше, чем для обычных дорожных или автокроссовых машин. Эти стандарты должны быть схожи с тем, что применяют в авиации. Спешка неприемлема в авиации и я применил тот же подход к машине. Как я писал, конечной целью было участие в SCC и NORC в 2001 и 2002 годах.

Я уже собирался участвовать в гонке NORC 2000 года, поэтому я поставил каркас безопасности в мой Mallett 435 98 года. Это другая легендарная машина, я не собирался на ней участвовать в высокоскоростных гонках до последней минуты. Передачи были установлены в спешке. Глядя в прошлое, я сделал это решение без каких либо сожалений. Машина

действительно вернулась к жизни в NORC и я потом участвовал на ней в нескольких других высокоскоростных гонках.

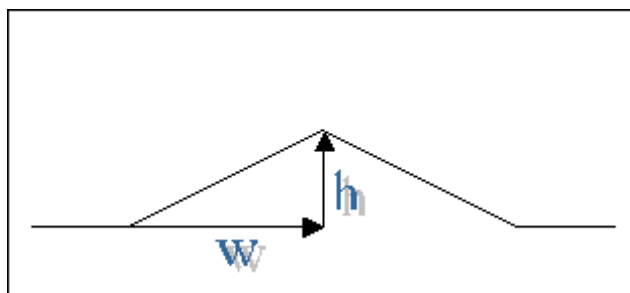
Наш план заезда состоял в том, чтобы ехать со скоростью до 265 км/ч. в течение нескольких минут. Частью плана было проделать испытания по трассе, естественно с разрешенной скоростью. На этом испытании мы отметили несколько неровных мест. Проходить их со скоростью 110 км/ч было страшно, но мы должны были знать, чего ожидать на скорости 265 км/ч. Поэтому прямо тут, в неизвестной глуши мы достали конверты, перевернули их, достали ручки из карманов и начали быстро писать. Гики гонщики в чистом виде.

Давайте потратим минутку и вспомним цели и методы расчетов на обратной стороне конверта (ОСК) которые описаны в главе 3. Часто нужно просто сделать грубую оценку или определить тенденцию. Часто это гораздо проще, чем дать точный и детальный ответ. Фактически простые расчеты могут быть выполнены на обратной стороне конверта прямо на месте. И это ключевой момент. Нам нужна просто идея как влияние неровностей будет меняться от скорости, и нам это нужно было прямо там «в поле».

Другим плюсом расчетов ОСК будет то, что это быстрая оценка достоверности числовых данных в лаборатории. Сложный инженерный анализ обычно включает в себя дюжины взаимосвязанных формул, которые решаются на компьютере с результатами, которые выводятся в виде таблиц, графиков, диаграмм. Интуитивно оценить здесь ничего не получится. Иногда просто глядя на таблицу или диаграмму невозможно сказать, верны ли результаты. С другой стороны для того чтобы сделать расчет ОСК часто приходится делать значительные упрощения, например рассмотрение машины как абсолютно твердого тела, рассмотрение её траектории без учета ширины или рассмотрение без учета влияния подвески или даже рассмотрение явлений с учетом того что масса автомобиля концентрируется в одной точке. Но несмотря на это результаты обычно не очень сильно отличаются от точных данных и разницу обычно можно объяснить простыми не численно выраженными явлениями. Если точные расчеты и расчеты ОСК различаются очень сильно тогда нужно всё очень внимательно проверить. Вероятно, ошибка будет в каком-то из расчетов.

Расчет ОСК это в действительности полуколичественный метод физического анализа. Эта книжка о физике гонок в противовес книжкам об инженерии гонок. Мы в первую очередь интересуемся фундаментальными теоретическими причинами объясняющими поведение автомобиля. Тенденция и грубые предположения, которые мы получаем в расчетах ОСК часто здесь работают. И мы будем всегда нацелены в первую очередь на физику.

Как обычно для обратной стороны конверта мы начнем рассматривать модель упростив её до таких кондиций чтобы мы смогли её легко решить. Примем кочку на дороге как пару одинаковых треугольников, один поднимающийся, другой опускающийся.



Пусть ширина каждого треугольника будет w а высота h . Допустим, машина будет приближаться к кочке с горизонтальной скоростью v . Для рассмотрения влияния кочки давайте ответим, какая вертикальная скорость будет у машин? Если мы допустим, что машина

твердое неупругое тело, мы получим бесконечное ускорение в момент контакта с углом треугольника. Мы получим ещё два раза бесконечность на других переломах кочки. Однако мы знаем, что шины и колеса сгладят эти внезапные импульсы. Расчет эффекта сглаживания шиной и подвеской кочек слишком затратен по времени даже если бы имели под рукой компьютер. Однако мы можем сделать полезные расчеты, если допустим, что ускорение будет происходить на всей поверхности кочки.

Если кочка будет пологой ($h \ll w$) а машина будет ехать быстро, горизонтальная скорость не будет меняться очень сильно и машина преодолеет верхнюю точку кочки за время $t = w/v$. За это время машина продвинется вверх на расстояние h , таким образом, вертикальная скорость машины будет $v_y = h/t = vh/w$. Отсюда вертикальное ускорение будет

$$a_y = v_y / t = h/t^2 = v^2 h / w$$

Ого, из расчетов видно, что влияние кочки имеет квадратичную зависимость от скорости. Кочку, которую вы просто заметите на скорости 80 км/ч, будет в 16 раз более чувствительна на скорости 320 км/ч, и определенно привлечет ваше внимание. Небольшая кочка, которую мы едва заметим на скорости 110 км/ч, будет в $(260/110)^2 = 5,5$ раз хуже на планируемой нами скорости. Расчеты также показывают, что чувствительность кочки будет обратно пропорциональна высоте. Более широкая кочка будет менее заметной. Это похоже на правду.

Теперь давайте немного проработаем анализ. Закон сохранения энергии ведет к тому, что горизонтальная скорость машины будет меняться. В нашем упрощенном двумерном расчете вектор скорости состоит из двух компонентов, вертикального и горизонтального. Численно он будет описываться уравнением:

$$|\vec{v}|^2 = v^2 = v_x^2 + v_y^2$$

эта формула будет работать и на ровном участке дороги и на кочке, безотносительно уклона. Здесь мы всегда предполагаем что «вертикально» означает в направлении силы тяжести Земли. Если мы будем считать что кинетическая энергии движущейся машины не будет меняться то $\frac{1}{2}mv^2$ будет величиной постоянной. Отсюда v^2 будет оставаться постоянной. На поднимающемся склоне кочки будет, вспомним тригонометрию:

$$v_x = v \cos(\arctan(h/w)) = vw / \sqrt{h^2 + w^2}$$

$$v_y = v \sin(\arctan(h/w)) = vw / \sqrt{h^2 + w^2}$$

Давайте обозначим $r = \sqrt{h^2 + w^2}$, тогда $v_x = vw/r$ и $v_y = vh/r$. Используя такой же метод расчета, получим вертикальную скорость v_y за время $t = w/v_x = wr / vw = r/v$. А вертикальное ускорение:

$$a_y = \frac{v_y}{t} = \frac{vh/r}{r/v} = \frac{v^2 h}{r^2} = \frac{v^2 h}{h^2 + w^2}$$

По-прежнему, эффект от кочки имеет квадратичную зависимость от скорости. Просто теперь, проезд кочки будет занимать немного большее время. Единственное отличие от первой формулы $v^2 h / w$ это появление в знаменателе h^2 .

Рассмотрим случай короткой и высокой кочки. Этот случай не был учтен в первом расчете, в котором предполагалось что $h \ll w$. Здесь на высокой кочке $h^2 \gg w^2$ и $a_y = v^2 / h$ будет означать, что чувствительность кочки будет снижаться линейно с увеличением высоты. В границах нашей модели это появилось потому, что более высокая скорость даст большее расстояние, на котором будет увеличиваться вертикальная скорость, но интуитивно это не кажется верным. Высокая кочка должна быть хуже, не так ли?

Более того, конечно при постоянном газе кинетическая энергия машины будет изменяться поскольку сила тяжести будет снижать вертикальную скорость. Поэтому в следующей итерации расчетов мы должны уменьшить a_y на $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Эффект от кочки от этого не станет хуже и очевидно, что здесь мы уперлись в ограничения налагаемые анализом ОСК. Для того чтобы преодолеть эти ограничения рассмотрим два вопроса (1) что насчет опускающейся стороны? и (2) что насчет ям?

Что насчет опускающейся стороны кочки, то упрощенная до жесткого тела машина будет просто следовать баллистической орбите от вершины кочки. Конечно реальную машину, эластичные колеса и подвеска сохраняют в контакте с дорогой, но небольшая потеря веса на некоторое время будет получаться по причине отбоя шин и пружин подвески. Тем не менее, любой знает, что баллистический снаряд следует по параболической орбите. Поэтому наша жесткая машина будет находиться в воздухе так долго, пока парабола от вершины кочки будет идти над поверхностью кочки. При простой модели кочки парабола будет всегда начинаться на вершине поднимающейся части и пересекать дорогу снова где-нибудь на опускающейся части или уже на плоской части дороги, в зависимости от горизонтальной скорости.

Что касается ям, то в противовес кочкам, жесткая машина будет находиться в баллистической фазе перед тем как начнет ускоряться вверх. В этом месте мы опять уперлись в ограничения модели. Но давайте вспомним, что предполагает ОСК, это получение общей тенденции и цифр в полевых условиях. Главное что мы хотели найти это то, как эффект от кочки меняется в зависимости от скорости автомобиля. И мы нашли простой ответ, в квадратичной зависимости. Мы видим несколько обстоятельств, где наша модель отклоняется от того что нам подсказывает интуиция и реальность, и это то что можно улучшить вернувшись в лабораторию.

Первое что нужно отметить, это то, что мы нарисовали пару треугольников для обозначения кочки. Сделали это мы только для того чтобы сосчитать время на преодоление кочки. Это не динамический анализ, выполненный надлежащим образом, в котором мы должны использовать законы Ньютона для того, чтобы описать движение автомобиля вниз и вверх по кочке. На первый взгляд можно сделать динамический анализ введя массу в уравнения. Мы нигде в расчетах ОСК не использовали массу. Динамический анализ обычно очень сложен для выполнения наспех, поскольку там используются дифференциальные уравнения, решаемые почти всегда на компьютере.

Ещё одна проблема касается нашей упрощенной геометрии кочки. Как уже отмечалось, строго говоря, эффект от кочки на твердое тело бесконечен, независимо от скорости. Причина следующая: машина получает вертикальное ускорение мгновенно, за время равное нулю, в тот момент, когда достигает точки. Поэтому скорость изменения вертикальной составляющей скорости, то есть ускорение будет бесконечно, когда машина достигнет кочки и затем будет равно нулю после прохождения верхней точки кочки.

Список необходимых улучшений нашей модели, которые нужно будет включить:

Более плавную геометрию кочки, принимающую во внимание тот факт, что начало кочки не может быть математически одномоментным. Нарисуем некоторую синусоиду или экспоненциальную кривую;

Интегрируем уравнения движения по кочке;

Более тщательно проработанную модель машины, включающую влияние гибких шин, пружин, амортизаторов, геометрию подвески, распределение веса, момент инерции и всё остальное. Это повлечет за собой разработку подвески.

Эти улучшения ведут нас напрямик в лабораторию. В идеале мы будем делать компьютерную модель. Как я давно говорил это конечная цель этой работы. Лучше поздно, чем никогда, правда?

Замечание к главе 14, зачем плавно. Последняя глава Физики гонок породила дебаты по поводу реальной величины жесткости пружин изменяемую «установочным отношением» Основной момент, породивший эту дискуссию - является ли 4 Гц реальной резонансной частотой реального автомобиля. Кажется, что это определенно слишком быстро для машины. С тех пор как я написал главу 14, я познакомился с Группой С Спорткаров Ferrari. Это автомобили, подготовленные для гонки Le Mans с маломощными и надежными двигателями. Это аэродинамически совершенные машины с граунд эффектом, которые позволяют добиваться 2,7g в поворотах и 4g на торможении. Дорожный просвет этих машин составляет лишь 10 мм, и они не должны цеплять днищем на кочках. Поэтому жесткость пружин там составляет 2450 кН/м. Я не знаю установочного отношения на этих машинах, но я думаю, что их резонансная частота будет больше чем 4 Гц.