

Езда на водных лыжах (или без лыж) за катером, вход космических кораблей в атмосферу Земли по касательной к ее поверхности, многократное подпрыгивание плоского камня, брошенного вдоль поверхности воды, движение автомобиля по мокрой дороге: – что общего между всеми этими часто встречающимися событиями? Во всех случаях происходит движение тела вдоль границы раздела двух сред, отличающихся своей плотностью. Взаимодействие тела с более плотной средой приводит к тому, что тело выталкивается в менее плотную среду. Иногда это полезно и даже приятно, а иногда очень опасно!

Движение тел вдоль границы раздела вода-воздух.

Вспомним, как движется вода при въезде автомобиля на большой скорости в лужу на дороге. Струи воды бьют веером из-под передних колес во все стороны! (На самом деле летят они не во все стороны: назад по ходу движения автомобиля их нет.) Совершенно аналогично ведет себя вода при катании на водных лыжах. Спортсмен движется в облаке брызг! А кто из нас не “пек блинчики на воде” в детстве? Помните? Плоский округлый камень бросают вдоль поверхности воды. При падении камня на ее поверхность из под него вода разбрасывается струями вперед и в стороны.

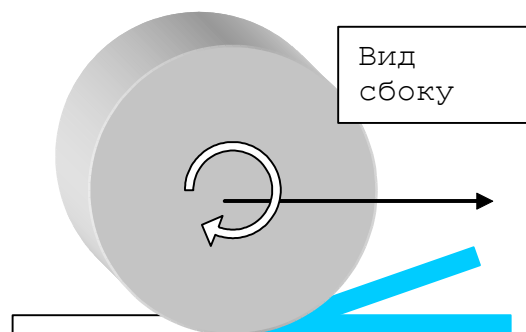
Обращали ли Вы внимание на то, что сразу после проезда автомобиля по мокрой дороге за ним остаются две почти “сухие” колеи, которые потом заполняются водой? Выемка на поверхности воды остается и после проезда воднолыжника. Небольшая ямка в воде остается после очередного “прыжка” камня. Космический корабль “опустошает” атмосферу в том месте, сквозь которое пролетает! Во всех перечисленных случаях суммарная сила, действующая со стороны более плотной среды на движущийся предмет, имеет составляющие вдоль и поперек границы. Продольная составляющая направлена навстречу движению предмета и тормозит его, а поперечная составляющая выталкивает предмет в сторону менее плотной среды.

Давайте ограничимся одним конкретным вопросом:

С какой максимальной скоростью может ехать (длительное время) легковой автомобиль по дороге, покрытой слоем воды $h = 1$ см?

(Если нам потребуется изучить движение другого предмета в такой же ситуации, то нам будет проще, потому что мы уже имеем опыт рассмотрения аналогичного движения: автомобиля по лужам.)

Удобнее всего перейти с систему отсчета, связанную с автомобилем. В этой системе отсчета вода вместе с дорогой движется относительно автомобиля со скоростью V . Будем считать, что глубина h (1 см) много меньше ширины колеса L и радиуса колеса R . Слой воды толщиной h «налетает» на колесо и упруго отражается от него. Дело в том, что вода практически несжимаема и её вязкость невелика, поэтому можно пренебречь потерями механической энергии. Будем считать, что глубиной рисунка протектора можно пренебречь в сравнении с глубиной слоя воды (1 см) и что струи воды вылетают из-под колеса только вперед, причем почти горизонтально.



Эти предположения существенно упростят расчеты, а учет того, что вода на самом деле разбрасывается во все стороны и под углом к горизонту, приведет к появлению числового коэффициента, равного по порядку величины единице. На рисунке показано колесо, из-под которого вперед бьет струя воды. За колесом “сухой” след, то есть задние колеса движутся по мокрой дороге с существенно меньшей толщиной слоя воды. В системе отсчета, связанной с

автомобилем, набегающая вода изменяет свой импульс, следовательно, на каждое из передних колес автомобиля действует со стороны воды сила. Легко показать, что при сделанных ранее предположениях горизонтальная составляющая этой силы примерно равна:

$$F \approx 2\rho hLV^2.$$

Здесь ρ – плотность воды.

Согласно уравнению Бернулли величина статического давления в точке поворота воды $\rho V^2/2$. Будем считать, что это же давление оказывается водой на колесо. Суммарная сила, действующая на колесо со стороны воды, имеет горизонтальную и вертикальную составляющие. Кроме составляющей силы, тормозящей автомобиль (то есть направленной навстречу движению), которую мы уже оценили, со стороны воды на колесо действует и вертикальная составляющая силы, приподнимающая его. Чтобы оценить величину этой силы, найдем величину площади одного колеса S , на которую оказывается это давление. Эта площадь примерно совпадает с цилиндрической поверхностью переднего колеса, которая контактирует с водой, то есть включает в себя участок от уровня дороги до уровня примерно $2h$.

$$S = 2L(Rh)^{1/2}.$$

Таким образом, на каждое (переднее) колесо автомобиля действует "подъемная сила" равная:

$$F_1 = L(Rh)^{1/2} \rho V^2.$$

Если эта "подъемная сила" сравняется по величине с весом, приходящимся на одно колесо автомобиля ($Mg/4$), то начнется "аквапланирование" и автомобиль потеряет управляемость, так как в этом случае пропадает сцепление передних колес с дорогой (вот она опасность!). К счастью для водителей автомобиль очень сильно тормозится водой, и если не добавлять мощности двигателю, автомобиль быстро теряет скорость. Автомобиль с задним приводом может продолжать двигаться в луже (правда управляемость его будет потеряна). Если же в лужу попала автомобиль с приводом на передние колеса, и началось аквапланирование, то отсутствие сцепления передних колес с дорогой означает, что скорость автомобиля независимо от желания водителя будет уменьшаться.

Давайте оценим, при какой скорости движения легкового автомобиля массой 1000 кг с равномерно распределенной на все четыре колеса нагрузкой, начнется аквапланирование передних колес со стертым протектором. Радиус колеса $R \approx 30$ см. Ширина покрышки $L \approx 15$ см. Вес, приходящийся на одно колесо, $P \approx 2500$ Н. Расчет показывает, что достаточно скорости 17,4 м/с (≈ 63 км/час). На то, чтобы разбрызгивать двумя колесами перед собой воду из лужи автомобиль при такой скорости движения вынужден расходовать мощность:

$$W = FV = 2 \times 2\rho hLV^3 \approx 32 \text{ кВт}.$$

Известно, что двигатель автомобиля «Жигули» с объемом цилиндров двигателя 1,3 л развивает максимальную мощность около 50 кВт. Это означает, что у заднеприводного автомобиля имеется достаточный запас мощности, чтобы продолжать движение по луже (Правда, без управления – ведь сцепления – то передних колес с дорогой нет!). Не зря производители шин рекламируют свои изделия, специально указывая, что разработанные ими рисунки протектора обеспечивают эффективный отвод воды. Однако водителю лучше все-таки снизить скорость при проезде лужи, чем надеяться на обещанную в рекламе безопасность и надежность шин.

Оцените самостоятельно, с какой скоростью может ехать по луже глубиной 1 см автомобиль с приводом на передние колеса (например, ВАЗ-2108).

Попробуйте также самостоятельно рассмотреть подпрыгивание камушка на спокойной поверхности воды. Можно считать, что максимальная скорость, с которой летит запущенный рукой камень массой 100 г, равна 15 м/с. Сколько раз подпрыгнет камень, прежде чем утонуть (проведите оценку)?

Какой должна быть форма камня, чтобы он хорошо «прыгал»?

С какой скоростью катер должен тянуть за собой спортсмена, чтобы он мог двигаться по воде без лыж?