

Игрушечное судно на воздушной подушке

(А. Щетников, «Квантик» №6, 2015)

В «Квантике» № 3 за 2013 год описано, как сделать игрушку на воздушной подушке из компакт-диска и шарика. Она скользит почти без трения по гладкой поверхности. За этим трюком и другими, ещё более удивительными, стоит интересная физика.

Парение над столом... и под потолком!

Возьмите пластиковую трубку с внутренним диаметром около 15 мм и отпилите от неё кусок длиной в несколько сантиметров. Прикрепите кусок трубки к центральному отверстию компакт-диска с помощью пластилина или термокля (к той стороне диска, где у него дорожки с информацией). Намотайте на трубку резинку, а затем наденьте резиновый воздушный шарик. Теперь закрепите на трубе горловину шарика резинкой. Аппарат готов.

Сначала повторим опыт с парением над столом. Надуйте шарик через отверстие, перекрутите его горловину, чтобы шарик не сдулся раньше времени, поставьте диск на гладкую горизонтальную поверхность и раскрутите горловину. Судно будет парить над столом несколько секунд, опираясь на поток воздуха, который течёт в узком зазоре между диском и столом и поддерживает диск «на плаву», как воздушная подушка. Этот опыт лучше получается с узкой трубкой, например, с корпусом от шариковой ручки.



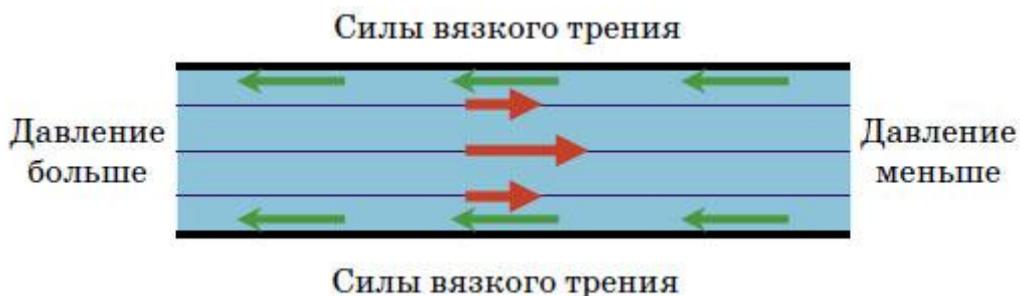
Для второго опыта ширина трубки должна быть не меньше сантиметра. Приставим диск с надутым шариком к ровному потолку и вновь дадим выход воздуху. Удивительно, но факт: теперь судно зависнет под потолком, и поток воздуха между диском и поверхностью потолка будет действовать на диск, как присоска.

По-видимому, дело в ширине зазора между диском и поверхностью. Под весом судна зазор становится уже, когда судно парит над столом, и шире, когда оно парит под потолком. Получается, что при узком зазоре диск отталкивается от поверхности, а при расширении зазора отталкивание сменяется притяжением. Эту зависимость просто пощупать руками: попытайтесь легонько то прижимать, то оттягивать парящий диск, и вы почувствуете его сопротивление. Эта же зависимость объясняет и то, почему диск парит над столом ровно, не заваливаясь на бок: опущенный бок сразу оттолкнётся, а поднявшийся — притянется обратно.

Как такое может быть?

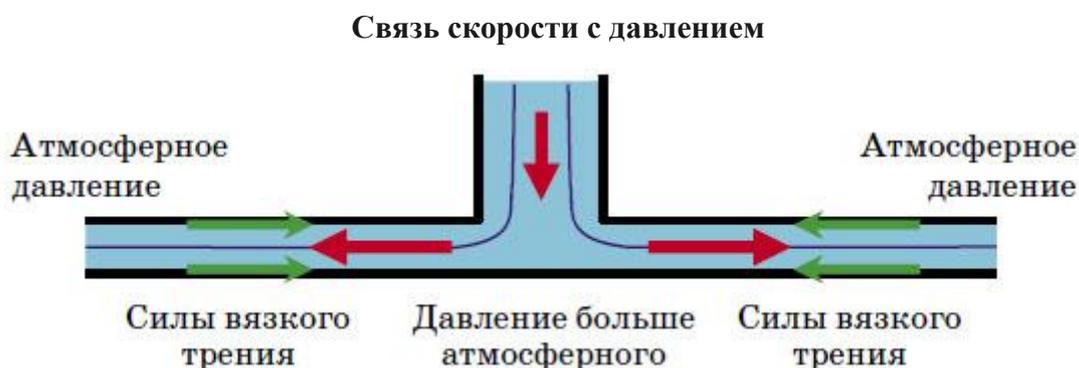
Объяснение отталкивания

Когда воздух или жидкость движется по длинным узким трубам, на их течение заметно влияет вязкое трение. На первый взгляд, жидкость могла бы скользить вдоль прямой трубы по инерции, её не надо постоянно проталкивать через трубу. Но в реальности пристеночные слои жидкости тормозятся стенками трубы, следующие слои тормозятся пристеночными, и так далее. Из-за этого, чтобы прокачивать жидкость через ровную трубу, нужно, чтобы дав-



ление на входе в трубу превышало давление на выходе — тогда разность давлений будет уравнивать вязкие силы, тормозящие жидкость.

Так же ведёт себя воздух в зазоре под диском, если зазор достаточно узкий. На самом краю диска давление почти атмосферное, а чем ближе к центру, тем оно должно быть больше, чтобы проталкивать воздух наружу, несмотря на трение. Это давление, вместе с реактивной тягой вылетающей струи, поддерживает диск «на плаву», когда он парит над столом.



Объяснение притяжения начнём с такого опыта. Держа пару стаканов на расстоянии полсантиметра друг от друга, сильно дуньте в щель между ними. Стаканы ощутимо дёрнутся друг к другу! Это проявляет себя закон Бернулли: если жидкость или газ протекает через трубу переменного сечения, то где скорость потока больше, там давление меньше. Поскольку через все сечения трубы за одинаковое время протекает одно и то же количество жидкости, скорость потока будет больше на узких участках трубы; значит, на узких участках давление будет меньше, чем на широких.

На первый взгляд закон парадоксален. Но подумайте сами: чтобы протолкнуть жидкость из широкой части трубы в узкую, надо разогнать её; а для разгона давление в широкой части должно быть выше, чем в узкой. И обратно, если жидкость из узкой части попадает в широкую, скорость в широкой части падает, и когда в эту медленно текущую жидкость втекает быстрая жидкость из узкой части, она своим напором создаёт в широкой части повышенное давление, которое её же и замедляет.





Притяжение диска

Вернёмся к диску. Воздух движется от центра диска к краю во все стороны сквозь щель постоянной ширины. Но чем ближе к краю, тем щель становится длиннее. Площадь щели увеличивается, а значит, скорость потока воздуха уменьшается. В результате, по закону Бернулли, давление на краю повышается. Но там оно почти атмосферное, а значит, ближе к центру диска оно было ниже. Вот и объяснение притяжению!

Соединим оба объяснения вместе

Может показаться, что оба опыта полностью разобраны: парящий над столом диск отталкивается от поверхности из-за сил вязкого трения, а парящий под потолком диск притягивается к поверхности из-за проявления закона Бернулли. Но ведь вязкое трение и закон Бернулли действуют в обоих опытах.

Оказывается, толщина щели как раз и определяет, какое давление окажется сильнее: от трения или от Бернулли. При сужении щели начинает «побеждать» трение и диск отталкивается, а при расширении трение «проигрывает» Бернулли и диск притягивается. В результате при любых отклонениях диск стремится вернуться на то расстояние, при котором отталкивание с притяжением компенсируются.

Чтобы убедиться в этом, сделаем такой мысленный опыт. Будем фиксировать диск на разных расстояниях от поверхности и следить, как при этом меняется баланс между давлением, вызванным силами трения, и понижением давления из-за закона Бернулли.

Например, начнём приближать диск к поверхности. Если при этом скорость потока воздуха везде останется неизменной, то не изменится и вклад от Бернулли. А вот эффект от трения увеличится. Во-первых, давление, борющееся с трением, теперь действует на меньшую площадь щели. Значит, давления понадобится больше для создания прежней проталкивающей силы. Во-вторых, вырастет и сама сила трения, с которой нужно справиться, так как стенки стали ближе к середине потока и сильнее его тормозят.

Итого: при меньшем зазоре и той же скорости потока вклад от Бернулли не изменится, а от трения — увеличится, и поток начнёт больше отталкивать диск. На самом деле, скорость упадёт (из-за большего трения). После этого трение уменьшится, но и эффект от Бернулли упадёт не меньше, так что опять баланс сместится в пользу трения и диск будет отталкиваться.

При расширении зазора все рассуждения сработают в обратную сторону.

Вот почему наше судно может летать и над столом, и под потолком.