

Непотопляемый диск

А. ЛУЗИН

ДЛЯ ОПЫТОВ вам понадобится тонкий диск, изготовленный из материала более тяжелого, чем вода. Например, из листа мягкой стали толщиной 0,2–0,3 мм, из алюминиевого листа толщиной 0,2–1,9 мм или оргстекла толщиной 0,3–6 мм. Наиболее удобен диск диаметром от 90 до 150 мм. В центре диска должно быть углубление высотой 1,5–3 мм и диаметром 12–15 мм.

Если такой диск положить на воду, то он может и не утонуть вследствие поверхностного натяжения жидкости. Но плесните на диск воду – он обязательно утонет, так как тяжелее воды. Подержите диск в руке, подставив его под струю воды, и вы заметите, что вода сильно давит на диск (это гидродинамическое давление струи воды). Результаты таких экспериментов вполне понятны, и в них нет ничего удивительного.

Теперь положите диск на воду и направьте в его центр (в углубление) сильную вертикальную струю воды – диск не тонет. Струя топит, а диск не тонет. Наиболее яркое впечатление производит диск из цветного оргстекла, сквозь который видны мелкие предметы, лежащие на дне сосуда. Опыт легко удастся, если струя воды достаточно ровная, гладкая, без видимых завихрений.

Так почему же диск не тонет? Понаблюдайте некоторое время и вы увидите, что на поверхности диска возникает кольцевая водяной порожек-ступенька, который растекающаяся из крана тонким слоем струя воды отгоняет все дальше и дальше к краям диска. В результате в области между центром диска и ступенькой образуется область

пониженного давления, и возникающая разность сил давления на диск снизу и сверху может оказаться достаточной для того, чтобы диск не тонул, несмотря на довольно значительное давление вертикальной струи воды. Здесь в интересной форме проявляются закономерности, описываемые уравнением Бернулли, в соответствии с которым тонкая быстрая струя воды, растекающаяся радиально по диску, отгоняет высокий водяной порожек, где скорость течения мала.

В гидравлике (это прикладная наука о законах движения и равновесия жидкостей) наблюдаемый нами водяной порожек называется гидравлическим прыжком. Гидравлический прыжок – это резкое, скачкообразное повышение уровня воды в открытом русле при переходе от бурного течения к спокойному. Его можно увидеть, например, в нижнем бьефе плотины, только там он не кольцевой, а прямолинейный. Кольцевой же гидравлический прыжок можно наблюдать и без диска, пустив вертикальную струю воды на дно кухонной раковины, даже если оно не совсем плоское и не совсем горизонтальное.

Основной теорией гидравлического прыжка является уравнение Бернулли, которое в случае открытого сверху канала с вертикальными стенками (берегами) и горизонтальным дном можно привести к виду

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2, \text{ или } E_1 = E_2,$$

где h – глубина потока жидкости, v – скорость течения жидкости в некотором поперечном сечении канала, $E = h + v^2/(2g)$ – величина, в гидравлике называемая удельной энергией сечения.

Если жидкость неидеальная, но внутреннее трение в ней не очень велико, вместо равенства записывается неравенство $E_1 > E_2$. В простейшем случае прямолинейного прыжка, когда ширина канала b везде одинакова, неравенство можно переписать в виде $E(h_1) > E(h_2)$, где $E(h) = h + Q^2/(2b^2gh^2)$, а $Q = vbh$ – расход жидкости, одинаковый во всех сечениях канала в случае стационарного течения.

Удельную энергию сечения E можно рассматривать как величину, зависящую только от h , причем немонотонно. При некоторой глубине потока h_k называемой критической, удельная энергия сечения имеет минимальное значение, при $h \rightarrow \infty$ она растет за счет первого слагаемого, а при $h \rightarrow 0$ – за счет второго слагаемого. Критическую глубину потока можно получить из условия $E'(h_k) = 0$, т.е. из равенства нулю производной E по h :

$$h_k = \sqrt{\frac{Q^2}{b^2g}}.$$

Легко видеть, что возможны стационарные потоки двух типов: а) скорость потока достаточно велика – при относительно малой его глубине ($h < h_k$) последняя медленно растет вдоль канала, а удельная энергия сечения медленно уменьшается; б) скорость потока достаточно мала – при относительно большой его глубине ($h > h_k$) последняя медленно уменьшается, а вместе с ней медленно уменьшается и удельная энергия сечения. Опыт показывает, что возможен и стационарный в целом поток, состоящий из трех частей: поток первого типа, поток второго типа и довольно узкая зона гидравлического прыжка между ними.

Как формируется такой сложный поток, как возникает гидравлический прыжок, разобраться довольно сложно. Поэтому мы ограничимся лишь приближенными представлениями. Ясно, что гидравлический прыжок образуется в канале с плоским горизонтальным дном, если кинетическая энергия жидкости в некотором сечении достаточно велика ($h < h_k$). По мере удаления от этого места по течению энергия E плавно уменьшается вследствие вязкости жидкости, глубина потока при этом плавно растет и достигает критического значения $h = h_k$. Дальше h плавно расти не может, так как при этом возрастала бы E , что противоречит нашему неравенству. Жидкость замедляется там, где $h \approx h_k$, и накапливается до тех пор, пока поток не стабилизируется. В потоке при этом образуется резкий скачок глубины.

Более детально разобраться в теории наблюдаемого в нашем опыте явления можно с помощью так называемой волновой теории гидравлического прыжка, которая позволяет рассчитать высоту ступеньки, скачок давления и возникающую дополнительную «подъемную» силу, удерживающую диск от погружения. Об этом можно прочитать, например, в замечательной книге Дж. Уокера «Физический фейерверк» (М.: Мир, 1989; задача 4.58).

