

Шарик в компоте: детский вопрос?

Поставлен вопрос: как объяснить распространённый физический фокус, когда плавающий в неполном стакане с водой шарик притягивается к стенке и прилипает к ней, но в том же стакане с водяной «горкой» – быстро занимает положение в центре.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: физический фокус, шарик в стакане с водой

С.Н. КИРИЛЛОВ

kirillov1965@yandex.ru,
Театр Занимательной Науки,
г. Москва

Собрались как-то учителя физики за круглым столом. Поставили в центр бокал и налили в него «компот». Миллиметра на три ниже края. Один из них на пинг-понговом шарике нарисовал весёлую физиономию – смайлик. Но улыбка получилась ехидной. Может, рука художника дрогнула, а может, шарик скривил губы, распознав подкрашенную красителем воду. Не суть важно.

С настроением подопытного никто не подумал считать-ся, и тот был отправлен в плавание – помещён в центр компотной поверхности. Через некоторое время шарик пристал к краю бокала.

Тогда бокал наполнили до краёв и долили ещё немного, чтобы поверхность вздулась горкой. Поместили шарик у её подножья. Тут-то озорник показал себя во всей красе, поразил собравшихся. Взял да и взобрался на самую вершину компотной горы. И там, в центре, замер, довольный собой.

Его поведение не одобрили.

«Умный в гору не пойдёт, умный гору...», – правильно, «обойдётся!» – припомнилась народная мудрость. А так как за столом сидели люди учёные, то они ещё и обобщили – любая замкнутая система стремится к минимуму потенциальной энергии.

Попытались образумить подопытного.

– Ах ты, глупышка, не ведаешь, что творишь, – ласково подтолкнули с горки вниз.

Но он вернулся обратно. И так происходило всякий раз, шарик демонстрировал своё «упрямство» и возвращался на вершину, в точку своего комфорта.

Классическая проблемная ситуация. Не верите – проверьте!

– На вершине горки явно находится потенциальная яма! – изрёк один проникательный товарищ.

– Такую школьник не «разглядит» – усомнились в ответ.

– Это поверхностное натяжение и силы Ван-дер-Ваальса! – многозначительно заметил другой собеседник.

– Коллеги, только без «божьей помощи», пожалуйста.

Природа, по Аристотелю, не терпит пустоты, а чего не терпит учитель? Пустоты в ответах на вопросы.

– Даёшь логическую цепочку доказательства! Объяснение «на пальцах», понятное любому малышу.

Это был вызов. И он был принят. Сначала решили понять суть, а уж потом переводить её на нужный язык. Но дело оказалось непростым, истина в споре рождаться не спешила.

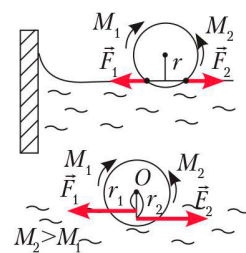
Изрисовали и исписали не один листок, даже компотом их умудрились залить. Не помогало! Вспомнили гидростатику и гидродинамику, капиллярность и лапласовское давление, усомнились в паре прописных истин... Тщетно!

Кто-то помянул, что видел какое-то объяснение в одной научно-познавательной книге. Решили воспользоваться подсказкой. Отыскали. Вот этот текст*:

Вначале о поверхности воды. У края стакана вода не горизонтальна. Она карабкается вверх, образуя мениск. Когда шарик плавает на поверхности воды, на него действуют силы сцепления с водой. Их называют силами поверхностного натяжения. На горизонтальной поверхности воды силы действуют на шарик со всех сторон одинаково.

У края стакана, где поверхность воды искривлена, т.е. имеет вогнутую форму, точка приложения сил «приподнимается». Стоит какому-нибудь случайному фактору чуть-чуть отклонить шар, как с одной стороны его (см. рисунок) момент сил становится больше, чем с другой, и шар, вращаясь, начинает двигаться к вершине водной горы, т.е. прибывает к краю стакана! (см. рис.)

Когда вода в стакане образует «горку» (мениск становится выпуклым), возникает также момент сил, который закатывает шарик в центр стакана, к вершине мениска.



Прочитали несколько раз, подумали... и не согласились. Во-первых, шарик на гору не закатывался, предсказанного под действием моментов сил вращения не наблюдалось. Он перемещался туда поступательно, улыбающаяся физиономия это подтверждала. (Позже попробовали заменить шарик цилиндрической крышечкой от пластиковой бутылки. Тот же результат.)

Во-вторых, усомнились в горизонтальности сил, изображённых на рисунке. Шарик смачивается компотом (созданный мениск рассмотрен под лупой). Молекулы жидкости карабкаются по его стенкам вверх – полная аналогия с человечками, поднимающимися по верёвочной лестнице. Но «действие равно противодействию»: если шарик тащит компотные молекулы вверх, то они толкают его вниз, увеличивая осадку.

В-третьих, раз шарик реально смещается к центру, то за это ответственна какая-то реальная (но пока непонятная нам «компотная») сила.

Стало ясно, что для осознания поведения шарика необходимо посмотреть на происходящее глазами отдельных молекул. По другому – никак.

Встреча единомышленников давно закончилась.

И я на той сказочной встрече был, «компот» пил, по усам текло, да в рот не попало... Теперь задумчиво кручу в руках шарик. Его улыбка кажется мне весьма вызывающей. Поиск истины продолжается.

*<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Mm3L5SVrqlCJ:old.home-edu.ru/mod/assignment/view.php%3Fid%3D28605+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ru>

Эксперименты с шариками



Приведены результаты экспериментов с шариком для пинг-понга, плавающим в стакане с водой. Реализованы случаи: чистый шарик в чистом стакане (вода смачивает и стакан, и шарик), шарик, покрытый гидрофобизатором, в чистом стакане (вода смачивает стакан, но не смачивает шарик), чистый шарик в стакане, обработанном спреем (вода не смачивает стакан, но смачивает шарик). Во всех случаях работает правило: «одноимённые» мениски притягиваются, «разноимённые» – отталкиваются. Соответствующие видеоролики даны в личном кабинете подписчика и на сайте <https://www.youtube.com/watch?v=WXE6pFNOuFo>

Е.В. АЛЕКСЕЕВА
 e-ever@yandex.ru,
 ЧУ СОШ Первая школа,
 г. Москва

Основные результаты

– **Мениск около шарика** никогда не получается выпуклым. Он изменяется от имеющего достаточно сильную кривизну (чистый шарик) до практически плоского (шарик после обработки водоотталкивающим спреем для обуви).

– **Стакан чистый, то есть смачивается водой.** В неполном стакане шарик прилипает к стенке (мениски «одноимённые», вогнутые), а в стакане с водяной «горкой» он отталкивается от стенки (мениски «разноимённые», у стенки – выпуклый, у шарика – вогнутый, причём заметно меньшей кривизны) и стремится занять положение устойчивого равновесия, то есть в центре стакана. При этом картинка менисков с обеих сторон шарика становится совершенно симметричной.



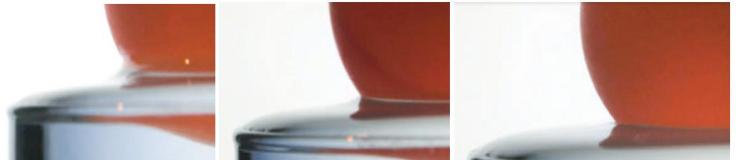
– Если приблизить шарик к стенке, например, подтолкнув пальцем, то мениск с ближней к стенке стороне шарика, уплотняется, а с противоположной стороны – становится круче. Шарик всегда движется в сторону более крутого мениска.

– Точно так же ведут себя шарик, покрытые парафином или спреем.

– Если спреем покрыть стенку стакана, то чистый шарик отталкивается от неё так же, как и на водяной горке. Если же спрей снять с части стенки, то шарик прилипает к ней.

– Пара любых шариков (оба чистые; один чистый, другой покрыт спреем; оба покрыты спреем) притягиваются друг к другу.

– Во всех случаях работает правило: «одноимённые» мениски притягиваются, «разноимённые» – отталкиваются.

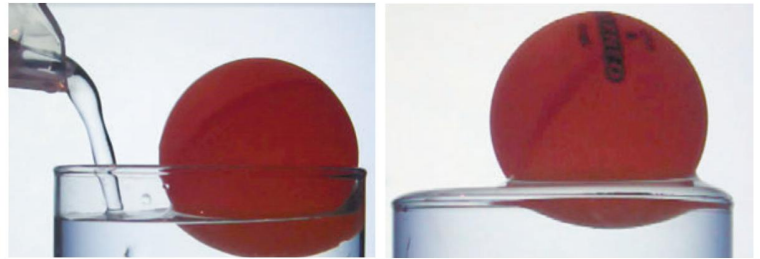


Чистый шарик

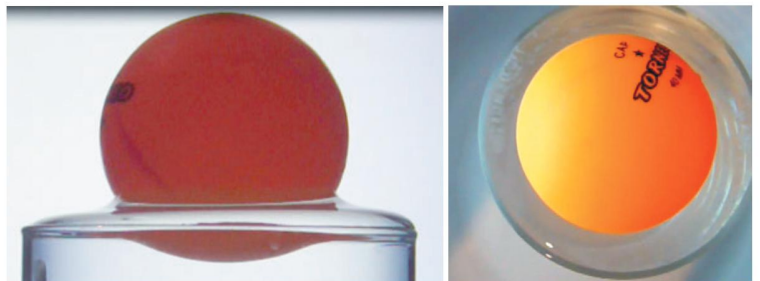
Шарик покрыт парафином

Шарик обработан спреем

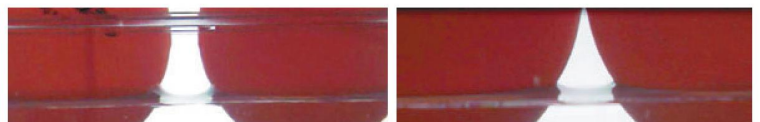
Мениск меняет форму в зависимости от смачиваемости поверхности шарика, но никогда не становится выпуклым



Шарик (и чистый, и с парафином, и со спреем) «прилипает» к стенке неполного чистого стакана, но отплывает от неё, когда вода образует «горку»



Шарик стремится занять положение устойчивого равновесия – в центре стакана с водяной горкой, причём во всех случаях, а если стенки стакана гидрофобизированы, то и в неполном стакане



Пара чистых шариков за мгновение до полного контакта

Пара шариков, обработанных спреем, полный контакт



Пара чистых шариков, полный контакт

Левый шарик чистый, правый обработан спреем, полный контакт

Всё дело – в давлении Лапласа

Приведено качественное объяснение явления «прилипания» шарика для пинг-понга к стенке стакана с водой и его стремления занять положение в центре стакана с водяной горкой. Привлекается понятие давления Лапласа, отвечающего за образование менисков в капилляре – выпуклого в случае несмачивания и вогнутого в случае смачивания. Соответствующие капиллярные явления – поднятие или опускание уровня жидкости – объясняется влиянием давления Лапласа.

И.Н. КОРНИЛЬЕВ
kornilev.i@mail.ru,
ОГОУ АО ДПО Институт
развития образования,
г. Астрахань

Смачивание и несмачивание

Каждый наверняка наблюдал, как растекается вода по горизонтальной поверхности чисто вымытой тарелки, как перекатывается капля воды по поверхности жирной сковороды или капустного листа, как легко, будто по бархату, скользит рука по вымытой гелем коже (а после долгого ополаскивания водой – перемещается «со скрипом»!) Никогда не забуду, как моя мама требовала ополаскивания до «скрипоты». Это было гарантией того, что «кусачее» мыло не попадёт в глаза. Эти и многие, многие другие примеры связаны со смачиванием или несмачиванием. Что же это за явления? В каком случае говорят, что жидкость смачивает поверхность, а в каком – не смачивает её?

Критерием смачивания является краевой угол. Предположим, капля жидкости находится на горизонтальной поверхности твёрдого тела. В первом приближении будем считать форму капли жидкости частью сферы – шаровым сегментом (рис. 1). Это приближение очень хорошо выполняется, когда капли малы, например, как средние или малые капли дождя.

Рассмотрим диаметрально сечение капли. Угол Θ между касательной к поверхности капли в точке линии контакта твёрдого тела (жидкости, газа) и поверхностью твёрдого тела, отсчитанный в сторону жидкости, называется *краевым углом*. В случае, когда жидкость смачивает поверхность твёрдого тела, краевой угол острый (рис. 1, а), если не смачивает – угол тупой (рис. 1, б). При полном смачивании краевой угол обращается в ноль ($\Theta = 0$). Вода хорошо смачивает чистое стекло, свежий скол слюды и не смачивает парафин,



Рис. 1

полиэтилен, фторопласт. Именно фторопласт (он же тефлон – американское название) используют в качестве ан-

типригарного покрытия кастрюль, сковород, противней.

Капиллярные явления

Если хорошо вымытую, открытую с обоих концов стеклянную трубку опустить в воду, то можно заметить, что уровень воды в трубке будет несколько выше уровня воды в сосуде (это явление называется *капиллярным поднятием*). При этом вблизи стенки стакана, как и вблизи стенки трубки вода немного приподнимается, образуя вогнутый мениск (рис. 2, а). Подъём воды в области мениска, очевидно, обусловлен некоторыми силами – а именно, силами взаимодействия между молекулами воды и стекла. Так как происходит подъём жидкости, то можно сделать вывод, что силы притяжения между молекулами стекла и воды больше, чем силы взаимодействия между самими молекулами воды.

Это явление можно объяснить и с энергетической точки зрения. А именно, энергетически более выгодной является замена части граничной поверхности стекло–газ на граничные поверхности стекло–вода и вода–газ, несмотря на то, что площадь плоской поверхности всегда меньше искривлённой (площадь поверхности полусферы больше площади круга, на который она опирается).

В случае несмачивания (рис. 1, б) силы взаимодействия между молекулами самой жидкости больше, чем между молекулами жидкости и молекулами твёрдого тела. То есть энергетически более выгодно уменьшение площади контакта жидкость–твёрдое тело и некоторое увеличение площади поверхностей жидкость–газ и твёрдое тело–газ. Это приводит к тому, что жидкость стремится принять форму почти полной сферы (рис. 1, б). На фотографии (рис. 2, б) видно, что при погружении в воду несмачиваемой трубки мениск вблизи неё выпуклый, а уровень воды в

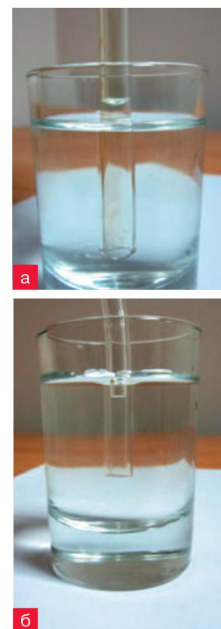
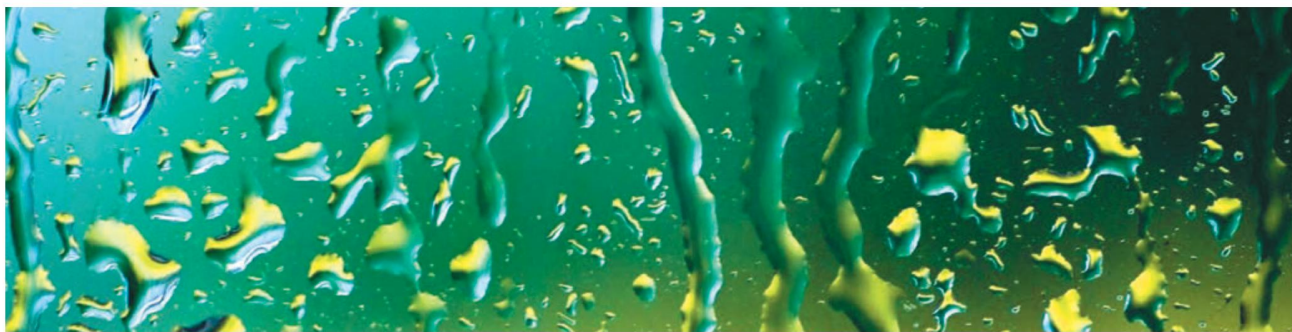


Рис. 2. а – случай смачивания: уровень воды в капилляре немного выше уровня воды в стаканчике; б – случай несмачивания: уровень воды в капилляре немного ниже уровня воды в стаканчике



<http://video.reiki.cn/wp-content/uploads/2015/01/8-hours-of-relaxing-rain-sleepin.jpg>

трубке ниже уровня свободной поверхности воды в стаканчике.

Осень. Пушкинская «унылая пора». Вспомним, как выглядят капли осеннего дождя, медленно стекающие по стеклу. За собой капля оставляет смоченный след, с которым она образует очень малый краевой угол. Наоборот, нижняя часть капли не течёт, а «накатывается», натекает на стекло, краевой угол велик – десятки градусов, приближается к прямому углу. Отличие наступающего краевого угла от отступающего – суть проявления явления гистерезиса краевого угла (гистерезис – от др.-греч. ὑστέρησις – *отстающий*). Возможно, вы встречались или встретитесь ещё с явлением гистерезиса при изучении поведения магнитов в изменяющемся магнитном поле или диэлектриков в изменяющемся электрическом поле. Говорят о явлении гистерезиса также в биологии, социологии и других науках. При полном смачивании гистерезис краевого угла отсутствует, как и сам краевой угол (он равен нулю).

Поместим каплю на стеклянную, хорошо, но не полностью смачиваемую пластинку, наклонённую к горизонту под некоторым углом β (рис. 3). Угол β таков, что капля ещё покоится на пластинке, но готова к стеканию. Различие величин «наступающего» $\Theta_{\text{н}}$ и «отступающего» $\Theta_{\text{о}}$ краевых углов, образованных каплей со стеклянной пластинкой, обусловлено явлением гистерезиса. Таким образом, равновесный краевой угол $\Theta_{\text{р}}$ может принимать все значения от $\Theta_{\text{о}}$ до $\Theta_{\text{н}}$!

Наберём в стеклянный стакан с вертикальными стенками воду. Будем, не наклоняя его, изменять уровень воды в стакане с помощью шприца

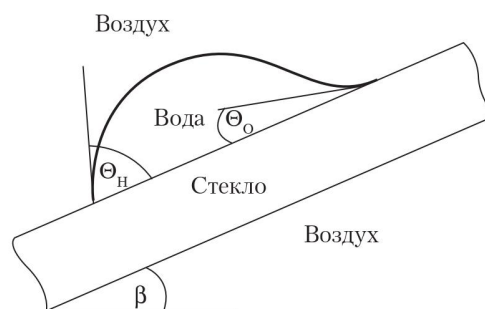


Рис. 3. Стекая по стеклу, капля воды может образовывать целый набор краевых углов вследствие явления гистерезиса

или резиновой груши. При отсасывании воды краевой угол, образуемый водой со стенкой, будет отступающим ($\Theta_{\text{о}}$), при добавлении воды – наступающим ($\Theta_{\text{н}}$), но в случае смачивания он всегда будет острым, а мениск вблизи стенки – вогнутым.

Рассмотрим ситуацию, когда стакан наполнен «до краёв», а края стакана гладкие (рис. 4). При добавлении воды её уровень станет выше края стакана, при этом краевой угол будет острым, а мениск – выпуклым (подчеркнём: угол – *острый*, вода *смачивает* стекло, мениск – *выпуклый*!) Получить «переполненный» стакан с выпуклым мениском позволяет именно явление гистерезиса краевого угла. В случае полного смачивания ($\Theta = 0$) жидкость при малейшем превыше-

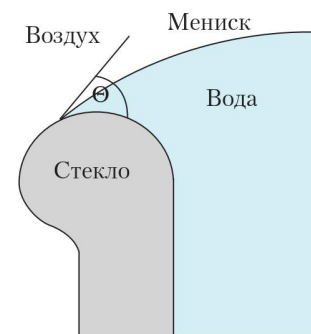
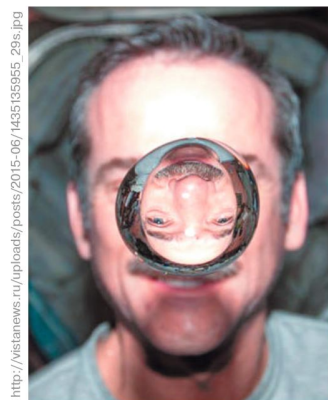


Рис. 4. Водяная горка – выпуклый мениск в переполненном стакане



http://vistanews.ru/uploads/posts/2015-06/1435159585_29s.jpg



http://img0.liveinternet.ru/images/attach/с/17/96/498/96498572_3906024_viewer_20.png

нии её уровня над краем сосуда будет выливаться, не образуя выпуклого мениска. Эффект «переполнения» усилится, если край стакана гидрофобизировать (покрыть тонким водоотталкивающим слоем, например, спреем для защиты обуви от намокания).

Теперь о давлении, обусловленном искривлением поверхности жидкости. Мы настолько привыкли к плоской поверхности воды в стакане или к плоской водной глади озера в безветренную погоду, что не задумываемся, почему в этих случаях видимая поверхность именно такая. Вспомним форму мелких капель воды (например, на ворсинках шерстяного пальто в туман), небольших пузырьков газа на стенках стакана, мыльных пузырей или огромных капель воды в кабине космического корабля. Почему форма поверхности жидкости в одних случаях плоская, а в других – сферическая? Какая из них наиболее естественна для жидкости – плоская или сферическая? Насколько плоска «плоская» поверхность воды? Ответ на последний вопрос наиболее прост. Поверхность воды в стакане или в озере так же плоска, как и плоска поверхность сферы, радиус которой равен радиусу Земли. Это связано с тем, что вода, как и все жидкости, обладает текучестью и находится в поле тяготения Земли. Поэтому свободная поверхность жидкости перпендикулярна радиусу земного шара.

Рассмотрим теперь маленькую каплю воды. Принимая форму сферы, она тем самым обеспечивает наименьшую площадь поверхности. Но минимальная поверхность соответствует минимальному значению некоторой энергии. Эту энергию называют *избыточной поверхностной энергией*. Отношение избыточной поверхностной энергии к площади поверхности, с которой она связана, называют коэффициентом поверхностного натяжения и обозначают σ . Очевидно, что σ выражается в Дж/м². Можно использовать силовой подход и выразить σ в Н/м. Оба подхода правомерны.

Сферическая форма малых капель воды на ворсинках шерсти свидетельствует о том, что в таких каплях развиваются силы, по порядку величины большие, чем их вес. Кроме того, эти силы сжимают саму каплю, создавая под её поверхностью избыточное давление. Подобные силы возникают в пузырьках газа, прилипших к стенке стакана, в мыльных пузырях. (Следует отметить, что в мыльных пузырях это давление удваивается, потому что стенки мыльного пузыря имеют две поверхности – наружную и внутреннюю.)

Соотношение, позволяющее рассчитать величину добавочного давления, впервые получили (независимо друг от друга) Пьер Симон Лаплас и Томас Юнг в 1805 г.:

$$p = k \frac{\sigma}{R}, \quad (1)$$

где p – давление (его обычно называют *давлением Лапласа*), R – радиус кривизны поверхности жид-

кости, k – числовой коэффициент. Для поверхности жидкости в форме цилиндрического жёлоба, $k = 1$, для сферической поверхности $k = 2$, для сферического мыльного пузыря $k = 4$.

Более точная запись соотношения (1) имеет несколько иной вид, вывод которого выходит за рамки школьной программы. Из точной записи следует, что возникает добавочная сила давления, направленная к центру кривизны поверхности жидкости. В случае выпуклого мениска (см. рис. 2, а) она направлена внутрь жидкости (давление Лапласа положительно), в случае вогнутого мениска (рис. 2, б) – наружу (давление Лапласа отрицательно). Это значит, что под выпуклой поверхностью жидкость сжата несколько сильнее, под нею давление немного больше, чем под плоской поверхностью. И наоборот: под вогнутой поверхностью давление немного меньше, и жидкость как бы несколько растянута.

Опустим в сосуд с водой перпендикулярно её поверхности стеклянный капилляр (смачивание считаем полным) и накроем крышкой (рис. 5). Вода в капилляре под действием силы давления Лапласа поднимется на высоту h , которая определяется равенством гидростатического давления и давления Лапласа: $\rho gh = 2 \frac{\sigma}{R}$, где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, R – радиус капилляра. Отсюда:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (2)$$

В случаях, изображённых на рис. 2, капиллярное поднятие (опускание) составляет около 3 мм. Если взять капилляр диаметром 2 мкм ($2 \cdot 10^{-6}$ м), то капиллярное поднятие составит примерно 14 м! Такой водяной столб создаст гидростатическое давление почти 1050 мм рт. ст.

Искривление поверхности жидкости приводит к ещё одному интересному явлению – изменению давления газа над поверхностью жидкости. Попробуем понять, почему так происходит и каков порядок величины добавочного давления. Вспомним, что с увеличением высоты подъёма над поверхностью Земли атмосферное давление уменьшается. Это изменение давления можно рассчитать по барометрической формуле. Если высота подъёма на уровне океана невелика (14 м), то уменьшение давления можно рассчитать по упрощённой формуле $\Delta p = \rho_{\text{возд}} gh$. Принимая $g = 10 \text{ м/с}^2$, $\rho_{\text{возд}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$, получим для вогнутого мениска $\Delta p = -181 \text{ Па}$, что соответству-

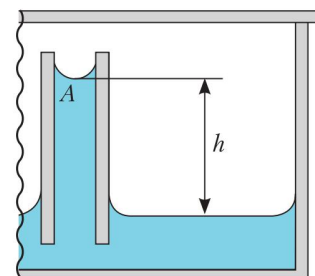


Рис. 5. В смачиваемом капилляре вода образует вогнутый мениск, который поднимается на высоту h над уровнем воды в стакане

ет уменьшению давления на 1,4 мм рт. ст. Для выпуклого мениска добавочное давление будет положительным.

Из сравнения добавочного давления над искривлённой поверхностью жидкости (–1,4 мм рт. ст.) и добавочного давления под искривлённой поверхностью жидкости (+1050 мм рт. ст.), становится понятным, что первое пренебрежимо мало по сравнению со вторым. Однако именно уменьшение давления над искривлённой поверхностью жидкости играет решающую роль при образовании зародышей капель из водяного пара (образование облаков, искусственное выпадение осадков, капиллярная конденсация).

Опыты с шариком

Поместим шарик для настольного тенниса в цилиндрический стеклянный стакан, заполненный водой не доверху. Пусть вода смачивает стенки стакана и шарик. Если шарик оказался не на оси стакана, то он начнёт двигаться к стенке стакана по кратчайшему пути (по радиусу) и «прилипнет» к ней. Тонкой струйкой аккуратно долём воду в стакан, чтобы образовалась водяная горка. Как только мениск начнёт принимать выпуклую форму, шарик «отчалит» от стенки и уплывёт в центр мениска, в положение устойчивого равновесия. Попытки вывести шарик из этого положения окажутся безуспешными – шарик возвращается в центр.

Попробуем объяснить происходящее с помощью классического примера с двумя плоскими шайбами, плавающими на поверхности жидкости*. Рассмотрим случай, когда шайбы не смачиваются жидкостью (рис. 6, а) – мениски вблизи шайб выпуклые. Пусть шайбы расположены близко друг от друга, так что мениски между ними перекрываются. Это приводит к тому, что в ограниченном пространстве между шайбами уровень жидкости понижается, как в несмачиваемом капилляре. Поэтому обращённые друг к другу стороны шайб оказываются слегка прито-

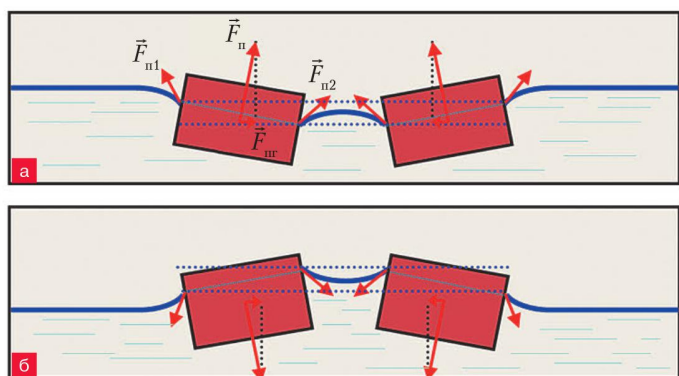


Рис. 6. Две шайбы, плавающие в воде, стремятся сблизиться друг с другом

*Благодарим А.И. Щетникова за предоставленный пример с шайбами и предложенное объяснение.

пленными. В связи с этим векторы сил поверхностного натяжения \vec{F}_{n1} и \vec{F}_{n2} будут наклонены к линии горизонта под разными углами. Результирующий же вектор этих сил \vec{F}_n , приложенный к каждой шайбе, отклонится от вертикали. Вертикальные составляющие не могут привести шайбы в движение, поэтому на рисунке не показаны (как и силы Архимеда, и силы тяжести). Горизонтальные же составляющие направлены навстречу друг к другу, что и приводит к сближению шайб.

В случае смачивания (рис. 6, б) уровень жидкости в ограниченном пространстве между шайбами оказывается выше (как в смачиваемом капилляре). Как и в предыдущем случае, появляются горизонтальные составляющие результирующих сил поверхностного натяжения, приложенные к каждой шайбе (силы показаны, но не обозначены). Шайбы снова стремятся к сближению.

Рассмотренная модель с шайбами позволяет понять, почему шарик** устремляется к смачиваемой стенке. Точно на оси стакана шарик оказывается в положении неустойчивого равновесия, из которого его может вывести любое случайное событие. Тогда сразу появляется горизонтальная составляющая результирующей силы \vec{F}_n , направленная по радиусу от центра к стенке стакана (рис. 7). Под её влиянием шарик движется к стенке и «прилипает» к ней.

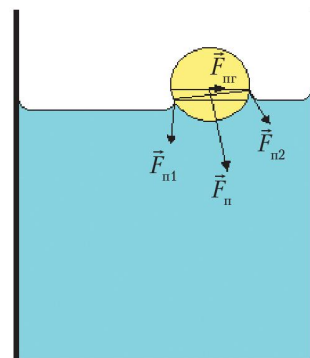


Рис. 7. Шарик (и смачиваемый, и несмачиваемый) стремится к стенке смачиваемого стакана

В случае, когда вода поднимается горкой над краем стакана (рис. 8, а), у его стенок возникает выпуклый мениск (зоны вблизи точек А и D), а около шарика, в зонах В и С – мениск вогнутый. Если шарик находится близко к стенке стакана, то в области АВ силы поверхностного натяжения формируют вогнутый и выпуклый мениски (выделены красным цветом). Накладываясь друг на друга, мениски формируют некоторую результирующую поверхность (показана зелёным на рис. 8, б) значительно меньшей площади, то есть обладающую меньшей свободной поверхностной энергией, что энергетически более выгодно.

В области зоны С, с «внутренней» стороны шарика, кривизна мениска не меняется, не изменяет-

**Как показали эксперименты, проведённые Е.В. Алексеевой (подробнее см. с. 57 и видеоролики в личном кабинете подписчика), у плавающих шариков мениск выпуклым не получается. Если шарик не смачивается, мениск просто отсутствует – поверхность воды плоская. – Ред.

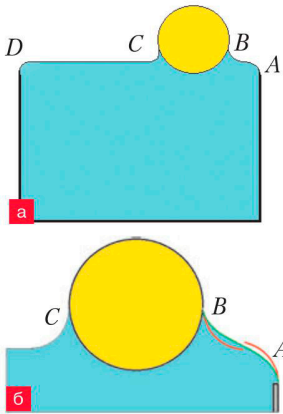


Рис. 8. Около шарика в воде образуется вогнутый мениск, кривизна которого больше на стороне, обращённой к центру стакана. Это значит, что давление Лапласа с этой стороны больше, чем с внутренней, то есть плотность воды меньше. Поэтому шарик движется к центру



Рис. 9. Пенопластовые шарики на намагниченных иглах в бокале с водой

ся и энергия этой зоны. Шарик начинает двигаться от стенки к центру. Чем сильнее перегибаются мениски зон *A* и *B*, тем быстрее шарик убеждает от стенки стакана. Движение шарика происходит до тех пор, пока картина менисков не станет симметричной, что отвечает минимуму энергии системы. А это происходит, когда шарик занимает положение устойчивого равновесия – в центре стакана. Любая

попытка вывести шарик из этого положения приводит к появлению возвращающей силы*.

Рассмотрим ещё один интересный пример баланса малых сил. В журнале № 11/2012, с. 8–9 (статья «Домашняя лаборатория») мною был описан опыт с намагниченными швейными иглами на поплавках – шариках из пенополистерола. Магнитные силы расталкивают иглы, прижимая шарики к стенкам бокала. Но картина не всегда получается симметричной из-за трения между поплавками и стеклом (рис. 9, *a*). Если же налить воду с «горкой» (рис. 9, *б*), картина получается почти идеально симметричной: магнитные силы уравниваются силами поверхностного натяжения (рис. 9, *в*).

*Если край стакана покрыть гидрофобизатором, то мениск у стенки получается выпуклым и в неполном стакане, – шарик отплывает от стенки к центру. В общем, работает правило, сформулированное А.И. Щетниковым: «одноимённые» мениски притягиваются друг к другу, «разноимённые» – отталкиваются (см. заметку «О плавающих шарах» в № 5–6, с. 61). – Ред.