

Эксперименты с мыльной пленкой

С.ВАРЛАМОВ

РАЗЛИЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА (ПАВ) настолько часто встречаются в нашей жизни, что мы без них буквально не можем вздохнуть. Так, обладая способностью адсорбироваться на поверхности жидкости, скажем воды, они уменьшают ее коэффициент поверхностного натяжения. Известно, например, что коэффициент поверхностного натяжения чистой воды при комнатной температуре равен примерно 70 мН/м. Соответствующий коэффициент для мыльного раствора зависит, естественно, от сорта мыла, но он всегда меньше, чем для чистой воды. В справочниках приводится примерно вдвое меньшая величина: 35 мН/м. Измененные свойства поверхности жидкости проявляются весьма своеобразно. Предлагаем несколько интересных экспериментов с мыльными пленками.

Для первого эксперимента возьмем тонкую нить длиной около 30 см, сделаем из нее кольцо, смажем нить вазелином и положим на поверхность чистой (желательно дистиллированной) воды, налитой в тарелку (тарелка тоже должна быть тщательно вымыта). Нить примет некую «неправильную» форму, т.е. ляжет на поверхности воды так, как ей «будет удобно». Теперь кончиком карандаша, смоченным в мыльном растворе, быстро прикоснемся к поверхности воды внутри нитяной фигуры. Нитка «оживет» и слегка изменит свою форму, приблизив ее к окружности. Еще двумя-тремя прикосновениями добьемся того, что нитяное кольцо станет (почти) окружностью, внутри которой – мыльная пленка.

Поэкспериментируем немного с этой пленкой. Сначала убедимся в том, что площадь мыльной пленки ограничена. Для этого чистой, вымытой в дистиллированной воде стальной ложкой зачерпнем немного воды внутри кольца и выльем эту воду в заранее приготовленный чистый стаканчик. Обратите внимание на то, что площадь поверхности воды, ограниченная нитяным кольцом, уменьшилась! Если удалить всю мыльную пленку (ложкой это сделать затруднительно, но можно воспользоваться резиновой грушей), то нить принимает прежнюю, «удобную» для нее форму. Этот эксперимент показывает, что молекулы мыла не уходят внутрь воды, а все собираются на поверхности внутри нитяного кольца. Конечно, если карандаш, смоченный в мыльном растворе, подольше подержать в воде, то молекулы мыла, заполнив всю поверхность воды внутри кольца, попадут и в ее толщу. Мыльная же пленка, полученная в нашем эксперименте, по всей видимости, является *монослоем*, в котором молекулы мыла одна к одной располагаются на поверхности воды одним слоем.

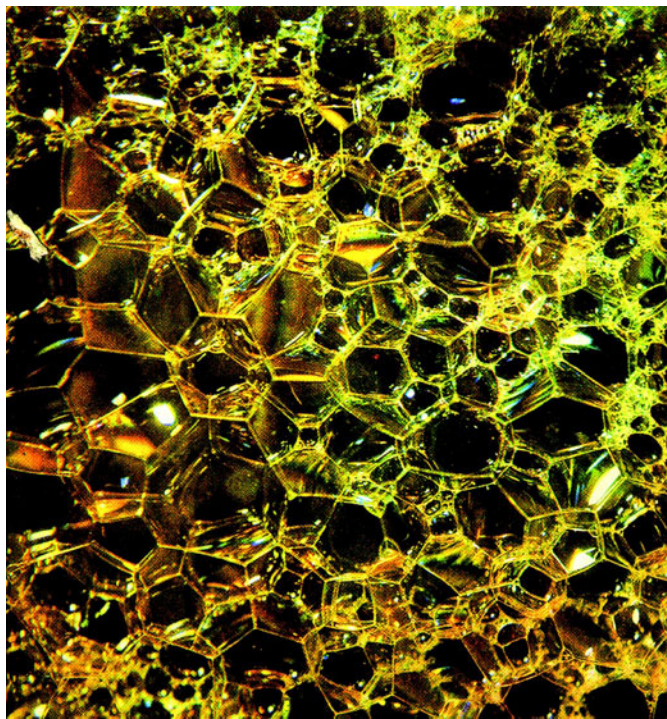
Возвратим воду из стаканчика снова внутрь нитяного кольца. Нить опять «оживет» и, как и прежде, примет форму, близкую к окружности. Отсюда следует, что за время своего отсутствия пленка не изменила своей площади, просто она частично находилась на другой поверхности – в стакане.

Любая система молекул, в том числе и система, содержащая молекулы воды и молекулы мыла, стремится занять положение, в котором ее суммарная потенциальная энергия была бы минимальной. Все молекулы конденсированных тел находятся в глубоких энергетических потенциальных ямах, созданных молекулами-соседками. Из того факта, что молекулы мыла «с удовольствием» занимают места на поверхности воды, следует, что потенциальная энергия этой системы молекул именно в таком случае принимает минимальное значение. И это «стремление» системы обеспечивается хаотическим тепловым движением, при котором молекулы могут преодолевать потенциальные барьеры, отделяющие одно положение, соответствующее минимуму энергии, от другого.

Заметим, что молекулы жирных кислот (мыла) по размеру значительно больше молекул воды и, кроме того, вытянуты. Разные концы одной молекулы мыла называют гидрофильным и гидрофобным. При попадании на поверхность воды молекулы мыла выстраиваются гидрофобными концами наружу (к воздуху), а гидрофильными – внутрь воды.

Выясним, как будет вести себя мыльная пленка, если нити не будет. Для этого сделаем пленку «видимой» – на поверхность чистой воды насыпем крупицы какого-нибудь порошка (талька, например). Вновь прикоснемся к поверхности воды кончиком карандаша, смоченного мыльным раствором. Понятно, что образующаяся на поверхности воды пленка мыла имеет возможность увеличивать свои размеры по всем направлениям. В этом случае капелька мыльного раствора осядет в центре растущего по всем направлениям пятна.

Во втором эксперименте можно изучить движение кораблика с «мыльным» двигателем (явление движения такого кораблика описано в самых разных книгах). Возьмите совсем небольшой кусочек тонкой полиэтиленовой пленки, например размером 1 × 1 см. Если вы взяли цветную пленку, то следить за ее движением будет гораздо легче, чем в том случае когда пленка прозрачна. На «борт» кораблика поместите капельку шампуня и опустите кораблик на поверхность чистой воды, налитой в ванну. Вы увидите, что кораблик придет в движение, причем с весьма заметной скоростью – до 50 см/с (интересно, что скорость корабля существенно



зависит от температуры воды). А полоска чистой воды за корабликом будет иметь среднюю ширину в несколько раз большую, чем ширина полосы контакта шампуня с водой (оказывается, скорость кораблика и указанное отношение ширин связаны друг с другом).

Что заставляет такой кораблик двигаться? Какую роль здесь играет мыльная пленка? Что изменится, если вдруг пропадет вязкость воды?

Может быть, вам уже встречалось, например, такое «объяснение»: «С одной стороны кораблика, там где вода чистая, на кораблик действует большая сила поверхностного натяжения, а с той стороны, где на поверхности воды есть мыльная пленка, сила поверхностного натяжения меньше. Вот эта разность сил и обеспечивает движение кораблика. Вязкое трение корабля о воду тормозит его движение, поэтому и устанавливается конечная скорость. Если вязкость воды уменьшится, то кораблик будет двигаться быстрее».

Так вот, это «объяснение» совершенно неверное! Представим себе мыльное пятно толщиной в одну молекулу на поверхности воды. Само по себе это пятно не движется. Поместим чистый кусочек полиэтиленовой пленки на край мыльного пятна так, чтобы по одну сторону полиэтилена находилась мыльная пленка, а по другую сторону – чистая вода (т.е. точно так же, как и в «объяснении»). Но пленка без полиэтилена не двигалась, так почему же теперь она придет в движение? А если все-таки придет в движение вместе с корабликом, то в нашем распоряжении окажется вечный двигатель – ничего не меняется, размеры мыльной пленки сохраняются, а кораблик плывет себе, преодолевая трение о воду!

В этом (неправильном) рассуждении считается, что при наличии мыльной пленки на поверхности воды поверхностное натяжение *меньше* поверхностного натяжения чистой жидкости. Это является заблуждением. Поверхностное натяжение мыльного раствора меньше, чем соответствующая величина для чистой воды, только до тех пор, пока при увеличении поверхности она покрывается пленкой из мыльных молекул. Как только в воде под поверхность (т.е. в объеме) закончатся «свободные» молекулы мыла, для дальнейшего увеличения поверхности нам потребуется увеличивать площадь поверхности чистой воды. Следовательно, мономолекулярная пленка мыльных молекул на поверхности воды имеет два коэффициента поверхностного натяжения: при сокращении поверхности такой пленки поверхностное натяжение такое, как у мыльного раствора, а при увеличении поверхности такой пленки коэффициент поверхностного натяжения становится равным соответствующему коэффициенту для чистой воды.

Заметим, что плывущий кораблик непрерывно расходует «топливо». Молекулы мыла переходят с «палубы» кораблика на поверхность воды, и площадь мыльной пленки увеличивается. Пленка растет как раз на границе «палубы» кораблика и разбегается по поверхности воды. Наличие препятствия (кораблика) означает для данного случая, что пленка может, скажем так, «свободно» увеличивать свой размер только в одном направлении. Пленка, увеличивающая свою поверхность, движется от корабля в одном направлении, а затем по мере удаления от корабля приобретает возможность расти и в стороны.

Далее, если бы вода не обладала вязкостью, то пленка не увлеклась бы ее в своем движении, т.е. воде не передавался бы импульс. В этом случае, учитывая, что масса самой мыльной пленки (слой толщиной в одну молекулу) мала по сравнению с массой кораблика, мы вообще не заметили бы никакого его движения. На самом же деле именно наличие вязкости обуславливает передачу воде импульса в направле-

нии движения пленки. Если рассматривать участок воды под пленкой, саму пленку и кораблик как систему тел, то можно сказать, что сумма сил, действующих на систему, равна нулю. Поэтому должен сохраняться суммарный импульс этой системы. Вода под пленкой приходит в движение в том направлении, куда растет пленка, следовательно, кораблик будет двигаться в противоположном направлении. Днище кораблика испытывает сопротивление движению из-за вязкого трения. Таким образом, вязкое трение воды и обеспечивает возможность движения кораблика, и тормозит это движение. Как только запас топлива закончится, сразу же прекратится действие «реактивной силы», и кораблик вскоре остановится, так как трение днища о воду затормозит его движение.

Итак, мы качественно описали механизм действия мыльного двигателя. Заинтересовавшимся этим экспериментом предлагаем попробовать построить физическую модель явления и получить формулу для зависимости установившейся скорости движения кораблика от всех существенных в данной ситуации физических параметров.

В заключение – еще один эксперимент, скорее всего мысленный. Представьте, что на поверхности большой капли чистой воды, плавающей в воздухе в кабине космической станции, находится смазанная вазелином тонкая нитка, образующая кольцо, причем меньшего радиуса, чем радиус капли. К большой капле медленно движется маленькая капля концентрированного мыльного раствора и прилипает к большой капле внутри нитяного кольца. Молекул мыла в капле мыльного раствора с избытком хватит, чтобы покрыть всю поверхность большой капли. Как будет со временем меняться форма большой капли?

Оказывается, мыльная пленка на сферической поверхности большой капли сравнительно быстро покрывает участок, ограниченный нитью. Будем считать, что на этом участке пленка возникает мгновенно. Изогнутая поверхность воды создает внутри капли дополнительное, так называемое лапласовское, давление $p = 2\sigma/R$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения, R – радиус капли. Под частью поверхности капли, покрытой мыльной пленкой, это лапласовское давление меньше, поэтому жидкость внутри большой капли придет в движение и устремится туда, где давление меньше. Поверхность воды вместе с мыльной пленкой дополнительно изогнется, и лапласовское давление повысится. Со временем установится равновесное состояние, при котором радиусы кривизны поверхности для чистого участка капли и для участка, покрытого мыльной пленкой, будут отличаться так, как отличаются коэффициенты поверхностного натяжения. В нашем случае радиусы кривизны должны отличаться в два раза, поскольку для чистой воды $\sigma_v = 70$ мН/м, а для мыльного раствора $\sigma_m = 35$ мН/м.

Однако на этом изменение формы капли не прекратится. Поскольку молекул мыла в капле мыльного раствора с избытком хватит, чтобы покрыть всю поверхность большой капли, молекулы мыла, которые содержались в объеме капли из мыльного раствора, быстро заполнят поверхность внутри нитяного кольца, а затем постепенно, вследствие диффузии, проникнут сквозь слой воды и расположатся на остальной поверхности большой капли. Пока вся поверхность большой капли не покроется молекулами мыла, поверхностное натяжение участков, разделенных нитью, будет различным. В течение этого времени форма капли будет сохраняться. Как только вся поверхность капли покроется молекулами мыла, форма капли начнет постепенно (по мере поступления молекул мыла через толщу воды) изменяться, приближаясь к сферической. В конце концов «объединенная» капля вновь будет иметь ту же форму, какая у нее была до столкновения с каплей мыльного раствора.