

Таким образом, на поверхности воды образуется двумерный «частокол» мыльных молекул, головы которых погружены в воду, а хвосты торчат наружу.

Как мыло понижает поверхностное натяжение? Молекулы на поверхности жидкости или твердых тел обладают избыточной потенциальной энергией по отношению к таким же молекулам, находящимся внутри. Эта энергия равна по величине работе, необходимой для того, чтобы молекулам выйти на поверхность, преодолевая силы притяжения соседних молекул. Очевидно, что поверхностная потенциальная энергия (U) пропорциональна площади поверхности (S):

$$U = \sigma S ,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, который определяется свойствами соприкасающихся жидкости и газа или жидкости и твердого тела, а также температурой окружающей среды. Как следует из таблицы 7, коэффициент поверхностного

Таблица 7

**Коэффициенты поверхностного натяжения
различных жидкостей**

Жидкости	Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м
Спирт этиловый	23
Ацетон	24
Бензин	29
Оливковое масло	32
Глицерин	63
Вода	73
Ртуть	440

натяжения может изменяться в довольно широких пределах, увеличиваясь в десятки раз от спиртов до ртути.

Так как с величиной поверхности жидкости связана потенциальная энергия сил поверхностного натяжения, то жидкость, стремясь к минимуму потенциальной энергии, всегда старается сделать эту поверхность меньше. И чем больше коэффициент поверхностного натяжения жидкости, тем с большей силой она будет стремиться минимизировать свою поверхность при прочих

равных условиях. Измерения показывают, что молекулы мыла на поверхности воды понижают ее поверхностное натяжение почти в 2,5 раза. Происходит это из-за того, что, находясь на поверхности воды «головой вниз», они, во-первых, не стремятся внутрь и, во-вторых, отталкиваются друг от друга, а не притягиваются, как молекулы воды. Таким образом, увеличивать поверхность воды, если в ней растворено мыло, легче. А это значит, что жидкость может проникать в щели между нитями ткани. Другими словами, мыло делает воду «более мокрой».

Как работает мыло? Мыльный раствор обволакивает частицы грязи, приводя к образованию эмульсий различных загрязняющих веществ, и удерживает нерастворимые частицы в состоянии суспензии в мыльной пене и воде, которые потом удаляются от очищаемой поверхности проточной водой. Для моющего

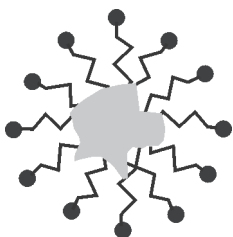


Рис. 66. Образование мицеллы из мыльных молекул вокруг частицы жира или грязи

действия важно то, что углеводородная часть (хвост) отрицательного иона мыльной молекулы нерастворима в воде, но растворима в жирах и маслах. Поэтому водорастворимая отрицательно заряженная голова остается в воде, тогда как хвост мыльной молекулы погружается в жир. Анионы мыльных молекул со всех сторон окружают капельки жира, образуя шарики – мицеллы (рис.66) и вытаскивают их в воду, в результате чего образуется взвесь капелек жира в воде. Так как каждая из мельчайших капелек несет на себе отрицательный заряд, то они отталкиваются друг от друга, а не сливаются в более крупные капли. Этим объясняется диспергирующий и эмульгирующий эффект мыльных растворов.

Почему горячая вода моет лучше? При нагревании средняя кинетическая энергия молекул воды увеличивается, а это значит, что каждой из них требуется меньше дополнительной энергии, чтобы выйти на поверхность. Поэтому поверхностное натяжение воды уменьшается при нагревании, и вода может проникать в самые мелкие поры и дырочки. Вот почему надо мыть руки горячей водой. Мыло и детергенты еще больше понижают поверхностное натяжение горячей воды.

Почему мыло плохо стирает в морской воде? Морская вода характеризуется высоким содержанием двухвалентных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} . Эти катионы связываются с отрицательно заряженными головками мыльных молекул, мешая им образо-

вать мицеллы вокруг частичек грязи и жира. Поэтому поверхностное натяжение мыльного раствора в морской воде увеличивается, что снижает качество стирки. То же происходит, когда водопроводная вода содержит высокую концентрацию двухвалентных ионов, например железа. Такую воду называют «жесткой», и в ней мыло стирает плохо.

Почему полоскать надо в холодной воде? Цель полоскания – убрать остатки мыла из выстиранной ткани. При стирке мы нагреваем воду, чтобы понизить поверхностное натяжение воды, и поэтому мыльный раствор залезает в самые тонкие промежутки между волокнами ткани. Чтобы он вылез оттуда, необходимо повысить поверхностное натяжение, тогда каждой из сплюснутых капелек опять станет выгодно стать шарообразной, и они выскочат из тонких промежутков между нитями. Поэтому полоскать ткань после стирки следует в холодной воде, когда ее поверхностное натяжение больше.

Надо ли использовать антибактериальное мыло? Мыльные молекулы обволакивают бактерии так же, как и частички прилипшей к коже грязи. Поэтому в мыльном растворе скоро оказывается большинство бактерий. Ученые доказали, что обычное мыло никак не хуже борется с бактериями, чем разрекламированное повсюду антибактериальное. В отличие от обычного, антибактериальное мыло содержит химические препараты (антибиотики), убивающие бактерии. Однако именно это и является недостатком антибактериального мыла. Дело в том, что антибиотик не в состоянии убить абсолютно все бактерии, а оставшиеся в живых «супербактерии» обладают необычайно высокой стойкостью по отношению к данному антибиотику. Они начинают размножаться, и скоро на нашей коже появляется столько же бактерий, сколько было до мытья, но все эти бактерии являются «детками» супербактерий, и поэтому многие из них переняли от своих родителей нечувствительность к действию этого антибиотика. В результате антибактериальное мыло скоро становится бесполезным, а супербактерии с кожи распространяются по всему организму, и бороться с ними нужно уже с помощью другого, более мощного антибиотика. В общем, «хотели, как лучше, а получилось...»

Что такое отбеливатель? В моющих средствах для стирки белья, помимо собственно детергента (мыла), используют еще и отбеливатель. Отбеливатели не удаляют грязь, а лишь обесцвечивают ее. Одни из них окисляют и тем самым разрушают некоторые виды загрязнителей и красящих веществ. Классическим окислителем для этих целей служит хлор. В современных

стиральных порошках используют более избирательные отбеливатели, основанные на броме. Другие отбеливатели, называемые усилителями белизны, делают выстиранное белье буквально белее белого. Для этого в стиральные порошки добавляют флюоресцирующий бесцветный краситель, который обеспечивает не только полное отражение видимого света, но и частичное превращение ультрафиолетового света в белый или голубоватый. В результате ткань становится ослепительно белой.

Ультразвук – механическое мыло. Размельчить грязь и превратить ее в эмульсию можно не только химическим образом, как это делает мыло, но и механически. Каждый знает, что если потереть испачканное место, а потом сполоснуть его в воде, то пятно станет менее заметным. Поэтому энергия звуковых волн может служить альтернативой обычному мылу при стирке. Для этого достаточно, чтобы скорости движения частиц воды и грязи в звуковой волне отличались. Тогда частички воды будут сталкиваться с частичками грязи, разрушать (диспергировать) их и перемешиваться, образуя эмульсию.

Известно, что в распространяющейся со скоростью c звуковой волне мгновенное значение давления p и скорость v перемещения частицы среды связаны соотношением

$$v = \frac{p}{\rho c},$$

где ρ – плотность среды. Произведение ρc , называемое акустическим импедансом, для жира на 10% меньше, чем для воды, поэтому при одном и том же звуковом давлении скорости движения частиц воды и грязи будут различны. Очевидно, что чем чаще звуковая волна встряхивает грязь, тем лучше для чистки и стирки, поэтому для достижения максимального диспергирующего и эмульгирующего эффектов используют ультразвук (УЗ) с частотой до нескольких сот килогерц.

Как получают ультразвук? Ультразвуковые волны в жидкостях обычно возбуждают магнитострикционными и пьезоэлектрическими преобразователями (генераторами). Пьезоэлектрические генераторы УЗ (рис.67) преобразуют электрическую энергию в энергию ультразвуковых колебаний, используя обратный пьезоэлектрический эффект – деформацию некоторых монокристаллов (например, кварца и сегнетовой соли), а также некоторых керамических материалов (например, титаната бария) в переменном электрическом поле. При этом в окружающей среде возникают соответствующие механические колебания. Пьезоэлектрические генераторы могут быть мощными источни-

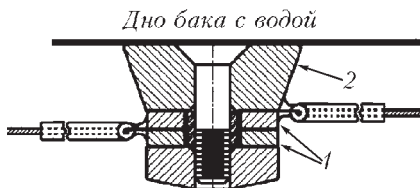


Рис. 67. Внешний вид пьезоэлектрического генератора УЗ и его схематический разрез: 1 – блок пьезоэлектрических преобразователей, 2 – металлическое соединение с дном контейнера с водой

ками УЗ с частотами до 1000 МГц. Используя пьезокерамику, поверхность излучателя часто делают сферической, что позволяет фокусировать излучение на малой площади, получая там очень большую интенсивность УЗ. Такая фокусировка используется, например, в литотрипсии – разбивании камней в почках и мочевом пузыре с помощью ультразвука без затрагивания окружающих тканей.

Магнитострикционные генераторы УЗ (рис.68) сначала преобразуют энергию электрического тока в энергию магнитного поля, а потом – энергию магнитного поля в механическую (звуковую или ультразвуковую) энергию. Их действие основано на том, что некоторые металлы (например, никель) и их сплавы деформируются в магнитном поле. Если стержень из такого металла расположить вдоль линий переменного магнитного поля, то

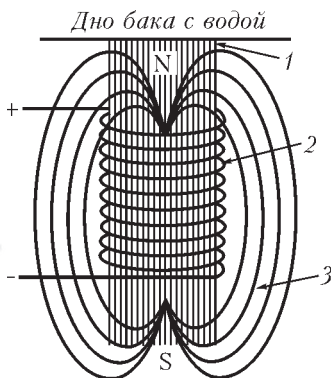
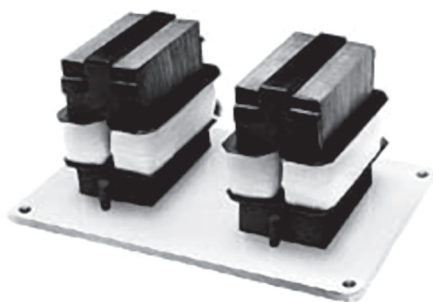


Рис. 68. Внешний вид магнитострикционного генератора УЗ и его схематический разрез: 1 – спаянное соединение металлических пластин и дна контейнера, 2 – катушка из проволоки, 3 – линии магнитного поля

этот стержень станет попеременно сокращаться и удлиняться, возбуждая в окружающей среде ультразвуковые волны той же частоты. Магнитострикционные преобразователи из тонкого листового металла работают лучше всего в низкочастотном диапазоне (от 20 до 50 кГц), а на более высоких частотах их коэффициент полезного действия становится очень малым.

Использование пьезоэлектрических генераторов кажется более предпочтительным, так как их можно применять в более широком диапазоне частот. Кроме того, при одной и той же выходной акустической мощности УЗ пьезоэлектрические генераторы потребляют меньше электрической энергии. Что касается акустической мощности, необходимой для стирки, то установлено, что 50 – 100 Вт вполне достаточно для стирки в 4 литрах воды. Если рассчитывать необходимую акустическую мощность на единицу поверхности излучателя, то она составит 45 – 60 Вт/дм².

Что такое кавитация? Оказывается, существенную роль в образовании эмульсий играет кавитация – образование в жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (так называемых кавитационных пузырьков, или каверн). Кавитация возникает в результате локального уменьшения давления ниже критического значения $p_{кр}$ – оно приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости. Если понижение давления происходит вследствие локального повышения скорости в потоке жидкости (вспомним уравнение Бернулли), то кавитацию называют гидродинамической, в случае же прохождения в жидкости акустических волн – акустической.

В обычной жидкости всегда присутствуют мельчайшие пузырьки газа или пара, и, оказавшись в области, где давление меньше $p_{кр}$, они начинают расти. После перехода в зону повышенного давления рост пузырька прекращается, и он начинает сокращаться. Если пузырек содержит достаточное количество газа, то по достижении им минимального радиуса он восстанавливается и совершает нескольких циклов затухающих колебаний, а если газа мало, то пузырек захлопывается полностью, и вблизи обтекаемого тела (например, на поверхности лопасти гребного винта) создается «кавитационная зона», заполненная движущимися пузырьками (рис.69).

Акустическая кавитация. Если звуковое давление во время полупериодов разрежения уменьшается ниже давления насыщенного пара, то в жидкости возникают кавитационные пузырьки, зародышами которых чаще всего являются мельчайшие газовые пузырьки, содержащиеся в жидкости. Сокращение ка-

витационного пузырька происходит с большой скоростью, и если это быстрое движение внезапно прекратится вследствие полного смыкания полости, то сконцентрированная в ничтожном объеме кинетическая энергия освободится и перейдет частично в тепловую энергию и частично в энергию сжатия. При этом из центра сомкнувшейся полости распространится кратковременный (порядка 10^{-6} с) импульс давления (до 10^9 Па и более), способный разрушить даже весьма прочные материалы. Кстати, для литотрипсии используются ультразвуковые колебания с акустическим давлением менее 10^8 Па.

Для того чтобы проверить, есть кавитация или нет, в жидкость можно опустить тонкую алюминиевую фольгу. Если УЗ вызывает кавитацию, то, вытащив кусочек фольги из жидкости, мы увидим в нем маленькие дырочки – следы кавитационных ударных волн. Чем меньше газа содержит пузырек, тем сильнее будет кавитационная ударная волна. С другой стороны, высокие концентрации растворенных газов замедляют смыкание кавитационных пузырьков, подавляя одновременно и эмульгирование. Поэтому процессу стирки обычно предшествует дегазирование жидкости с помощью ультразвука. Это происходит из-за того, что уже имеющиеся в жидкости пузырьки газа под действием ультразвука соединяются в более крупные и всплывают. Кроме того, и сама кавитация приводит к дегазации жидкости. Интенсивные колебания газонаполненных пузырьков вблизи поверхности твердых тел создают микропотоки жидкости, делающие ультразвуковую стирку и чистку более эффективной.

Как гидростатическое давление влияет на кавитацию? В вакууме жидкость лишена микропузырьков, и поэтому УЗ не вызывает в ней ни кавитации, ни эмульгирования. Понижение внешнего давления ниже атмосферного, меньше 20 кПа, мешает смыканию возникающих кавитационных пузырьков, уменьшая мощность кавитационных ударных волн. Очень высокие давления, больше 10000 кПа, уничтожают микропузырьки, являю-

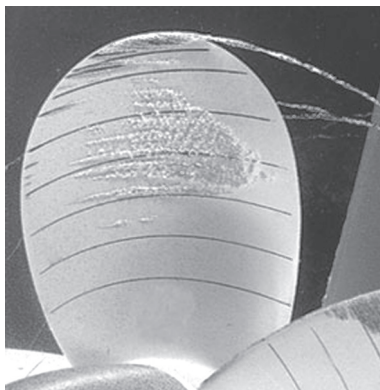


Рис. 69. Возникновение кавитационных пузырьков вблизи поверхности лопасти вращающегося гребного винта

щиеся зародышами кавитации, препятствуя ее возникновению. Однако увеличение гидростатического давления до 200 кПа помогает схлопываться до конца большинству кавитационных пузырьков, поэтому подводники замечают, что кавитация, измеряемая по интенсивности шума гребных винтов, резко увеличивается при погружении на 10–20 метров, а потом идет на убыль.

Ультразвуковая очистка. С помощью УЗ можно не только стирать, но и очищать поверхности металла или стекла от мельчайших посторонних частиц, жировых пленок и других видов загрязнения. Для этого предмет, подлежащий очистке, помещают в жидкость с источником УЗ, и схлопывающиеся кавитационные пузырьки срывают с обрабатываемой поверхности нежелательные частицы. В промышленности используется ультразвуковое оборудование для очистки поверхности кварцевых кристаллов для механизма часов, оптического стекла и ювелирных украшений. УЗ также помогает сделать абсолютно гладкими детали шарикоподшипников и снять заусенцы с малогабаритных деталей.

Ультразвук какой частоты лучше чистит? Чем выше частота УЗ, тем большее звуковое давление требуется для появления кавитации. Это происходит из-за того, что образование каждого кавитационного пузырька требует определенного времени. Например, в обычной воде кавитация возникает при звуковом давлении 100 кПа, если частота звука 15 кГц, и только при 400 кПа, если частота 175 кГц. Инерция колебаний кавитационных пузырьков делает зависимым их диаметр от частоты: при 15 кГц – 200 мкм, а при 175 кГц – 20 мкм.

Очевидно, что чем больше кавитационный пузырек, тем больше энергия ударной волны, образующейся при его схлопывании. Поэтому частоты ниже 80 кГц используются, как правило, для технических целей, где требуется удалить большие загрязнения, а иногда и целые слои грязи или ржавчины. Однако крупным пузырькам тяжело пролезть в щели, чтобы вытащить оттуда грязь, а значит, нужны и мелкие пузырьки, которые будут работать там, где большие не могут. Поэтому для хорошей чистки и стирки необходим генератор УЗ с плавающей частотой.

Как ультразвук борется с бактериями? Самым эффективным способом дезинфекции служит кипячение. Однако, когда инструмент (например, эндоскопический зонд), подлежащий дезинфекции, сделан из пластмассы, кипячение может навсегда испортить его. Выходом из положения в таких случаях является ультразвуковая дезинфекция. Импульсы давления,

возникающие в кавитационных пузырьках, приводят к гибели бактерий и микроорганизмов, находящихся в водной среде, подвергаемой действию УЗ. Кроме того, установлено, что УЗ расщепляет высокомолекулярные биополимеры на фрагменты с относительной молекулярной массой около 30000 при экспозиции 5–10 мин.

История и настоящее ультразвуковых стиральных машин.

Первый раз в мыльном растворе с помощью УЗ выстирали хлопчатобумажные простыни, испачканные жирной сажой, в 1949 году. Для этого понадобился 1 час работы и пятикратная смена воды. Обычная стирка в том же растворе заняла 3 часа и потребовала пятнадцатикратную смену воды. Как отмечали изобретатели, по сравнению с обычной, ультразвуковая чистка не снижала прочность простыней. Прошло 50 лет, но до сих пор, к сожалению, ультразвуковая стирка не находит широкого применения в быту, хотя ее старшая сестра ультразвуковая чистка активно работает в лабораториях и в промышленности.

В продаже у нас все чаще появляются миниатюрные ультразвуковые стиральные машины, потребляющие очень малую мощность (5–15 Вт) с излучателем размером 5–10 см. Но они стирают лишь несколько слоев ткани, соприкасающихся с поверхностью излучателя. Таким образом можно убирать пятна на ткани перед обычной стиркой. Однако УЗ в таких машинах, как утверждают изготовители, лишь делает более эффективным действие deterгента, доставляя его к местам загрязнения. В то же время одна из японских компаний уже несколько лет выпускает ультразвуковые стиральные машины, рассчитанные на 8 кг белья, не требующие для стирки стирального порошка. При стирке через воду пропускают ток, происходит гидролиз воды, и получающиеся продукты гидролиза – активный кислород, озон и перекись водорода – являются тем коктейлем, который вполне заменяет стиральный порошок. А так как в воде всегда содержится хлор, то при гидролизе образуется еще гипохлорная кислота (HOCl), которая является хорошим отбеливающим и дезинфицирующим препаратом.

Очевидно, что дальнейшее внедрение ультразвуковых стиральных машин позволит уменьшить энергетические затраты на стирку, а также количество используемых deterгентов, делая этот процесс менее экологически вредным.

ТЕПЛО И ХОЛОД: ФИЗИКА И БИОЛОГИЯ

Жизнь возможна только в очень узком диапазоне температур окружающей среды – от нескольких градусов ниже 0°C (температура замерзания чистой воды) до $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$ выше нуля. Чтобы сделать свою жизнь более комфортной и не испытывать переохлаждения или чрезмерного нагрева, человек носит одежду, нагревает свой дом зимой и охлаждает его летом. О том, какая физика стоит за чувством холода и жары, что такое тепловые насосы и крионика, и пойдет речь в этой главе.

Почему человек чувствует себя лучше, когда его температура около 37°C ? Нам хорошо, когда у нас $36,6^{\circ}\text{C}$, но стоит нашей температуре увеличиться или уменьшиться лишь на 1°C , нам становится жарко или холодно. Ну а если температура тела отклоняется от нормальной на 4°C , то жизни человека грозит большая опасность. Такая тонкая чувствительность человека к температуре тела связана с тем, что самые важные химические реакции в нашем организме происходят с участием ферментов – химических соединений, ускоряющих или замедляющих протекание этих реакций. Способность фермента влиять на скорость определенной химической реакции в первую очередь определяется пространственной структурой этой

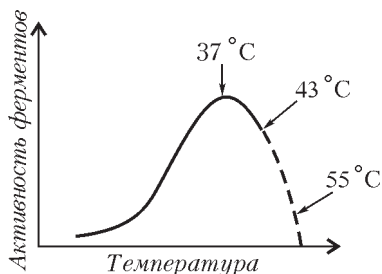


Рис. 70. Зависимость активности ферментов (скорости химических реакций с их участием) от температуры: сплошная линия – обратимые изменения, пунктирная – необратимые

огромной молекулы. С изменением температуры пространственная структура молекулы фермента изменяется, и он перестает «работать». Поэтому скорость работы, т.е. активность, многих ферментов максимальна при 37°C , а при нагревании выше 43°C они уже необратимо портятся (рис.70). Узкий диапазон температур работы ферментов и определяет ту область температур, в которой мы чувствуем себя комфортно.