

Урок 4. Поверхностное натяжение

Физика вокруг нас · ~35 минут

Водомерка бегает по воде, как по батуту. Стальная скрепка — плотнее воды в восемь раз — умеет на ней лежать. Капля дождя круглая, хотя её никто не лепил. За всем этим стоит одна невидимая сила: поверхность воды ведёт себя как натянутая упругая плёнка. Сегодня поймём почему — и заставим перец в панике удирать от капли мыла.

Что ты узнаешь

- Почему у воды есть «плёнка» и откуда берётся поверхностное натяжение.
- Почему капля стремится стать шаром.
- Как водомерка и скрепка держатся на воде, будучи тяжелее её.
- Почему мыло мгновенно разрушает поверхностную плёнку.

Разбираемся в теме

Откуда берётся плёнка


Начнём с самого начала — с молекул. Любая жидкость состоит из молекул, и эти молекулы **притягиваются друг к другу**. Это так называемые силы межмолекулярного притяжения: каждая молекула тянет к себе соседей, и соседи тянут её обратно. Именно поэтому вода вообще остаётся жидкостью и не разлетается в пар при комнатной температуре — молекулы держатся друг за друга.

Теперь мысленно возьмём две молекулы и сравним их положение.

Молекула глубоко внутри жидкости. Вокруг неё соседи со всех сторон: слева и справа, спереди и сзади, сверху и снизу. Каждый сосед тянет её к себе. Но соседи расположены равномерно во все стороны, поэтому сила слева уравновешивается силой справа, сила сверху — силой снизу, и так далее. **Все**

силы гасят друг друга, суммарная сила равна нулю. Такой молекуле «всё равно» — её никуда не тащит.

Молекула на самой поверхности. Снизу и по бокам у неё есть соседи-молекулы жидкости, а вот **сверху соседей нет** — там воздух, а молекулы воздуха далеко и почти не притягивают. Значит, силу снизу и вбок ничто не уравнивает сверху. В итоге остаётся **результатирующая сила, направленная внутрь жидкости** — поверхностную молекулу как будто втягивает вниз.

 **Откуда это видно?** Представь толпу, где каждый держит за руки соседей. Человек в середине толпы тянут во все стороны поровну — он стоит спокойно. А человека с краю тянут только внутрь толпы — его затягивает к центру. С молекулами то же самое.

Что из этого следует? Раз каждую поверхностную молекулу тянет внутрь, то и вся поверхность стремится **втянуться, сократиться, стать как можно меньше по площади.** Молекулам «выгоднее» сидеть в глубине, где их держат со всех сторон, чем торчать на поверхности. Чтобы **увеличить** площадь поверхности (вытащить новые молекулы из глубины наружу), нужно совершить работу — преодолеть притяжение соседей.

Вот и получается эффект **натянутой плёнки**: поверхность жидкости сопротивляется растяжению и всё время пытается сжаться, как растянутая резинка стремится сократиться.

Что такое коэффициент поверхностного натяжения σ

Чтобы описать эту «плёнку» числом, вводят **коэффициент поверхностного натяжения** σ (греческая буква «сигма»). Его можно ввести двумя разными способами — и это важно понять, потому что оба используются в задачах.

Способ 1: через силу (Н/м). Представь, что мы разрезали поверхность плёнки по линии длиной L . Плёнка по одну сторону разреза тянет к себе, по другую — тоже к себе, с некоторой силой F . Эта сила тем больше, чем длиннее линия разреза. Естественно ввести силу на единицу длины:

$$\sigma = \frac{F}{L}$$

σ — сила натяжения F на единицу длины края плёнки L ; единицы Н/м.

То есть σ показывает, **сколько ньютонов натяжения приходится на каждый метр края плёнки**.

Способ 2: через энергию (Дж/м²). Мы уже выяснили: чтобы увеличить площадь поверхности, надо совершить работу (вытащить молекулы наружу). Значит, у поверхности есть **дополнительная энергия**, пропорциональная площади. Введём энергию на единицу площади:

$$\sigma = \frac{E}{S}$$

σ — поверхностная энергия E на единицу площади S ; единицы Дж/м².

То есть σ показывает, **сколько джоулей энергии «спрятано» в каждом квадратном метре поверхности.**


Почему это одно и то же? Проверим по размерности — это ключевой шаг. Вспомним, что джоуль — это ньютон на метр (работа = сила \times путь):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$


Подставим в единицу энергии на площадь:

$$\text{Дж}/\text{м}^2 = (\text{Н} \cdot \text{м})/\text{м}^2 = \text{Н}/\text{м} \text{ — получаются те же самые единицы.}$$

Единицы совпали! Значит, «сила на длину» и «энергия на площадь» — это **одна и та же величина**, просто записанная по-разному. И число одно и то же.

 **Интуиция.** Растянуть плёнку на кусочек площади ΔS — это то же самое, что протащить край длиной L на расстояние Δx (тогда $\Delta S = L \cdot \Delta x$). Работа = сила \times путь = $(\sigma \cdot L) \cdot \Delta x = \sigma \cdot (L \cdot \Delta x) = \sigma \cdot \Delta S$. Слева стоит σ как «сила на длину», справа — σ как «энергия на площадь». Один и тот же σ .

Для воды при комнатной температуре $\sigma \approx 0,073 \text{ Н}/\text{м}$ (это же $73 \text{ мН}/\text{м}$, или $0,073 \text{ Дж}/\text{м}^2$). Это одно из самых больших значений среди обычных жидкостей — «виноваты» особо прочные водородные связи между молекулами воды.

 **Запомни:** поверхность жидкости всегда стремится к минимальной площади, потому что так минимальна её энергия. Всё поведение плёнки — следствие этого одного принципа.

Почему капля круглая

Теперь применим главный принцип: **поверхность хочет иметь минимальную площадь**, потому что тогда поверхностная энергия $E = \sigma \cdot S$ минимальна.


Но есть ограничение: объём капли задан (сколько воды налили — столько и есть, никуда не денется). Значит, вопрос такой: **из всех тел одного и того же объёма — у какого площадь поверхности наименьшая?**

Ответ математики знают давно: это **шар**. Сравним для наглядности шар и куб одинакового объёма.

- Возьмём объём $V = 1$ (в каких-то единицах).
- Площадь поверхности шара такого объёма: $S_{\text{шар}} = (36\pi)^{1/3} \cdot V^{2/3}$. Подставим $V = 1$ и посчитаем: $36\pi \approx 113$, а кубический корень из 113 $\approx 4,84$. Значит $S_{\text{шар}} \approx 4,84$.
- Площадь поверхности куба такого объёма: $S_{\text{куб}} = 6 \cdot V^{2/3} = 6 \cdot 1 = 6$.

Видно, что $4,84 < 6$ — у шара площадь меньше при том же объёме. А раз меньше площадь, то меньше и энергия $E = \sigma \cdot S$. Поэтому свободная капля «сама», без всякой лепки, стягивается в шар — так ей энергетически выгоднее всего.

Правда, на всё это влияет **гравитация**. Крупную каплю на столе тяжесть расплющивает в лужицу. Но у мелких капель (роса, туман, капли в невесомости) вес крошечный, натяжение побеждает — и они получаются почти идеальными шариками.

 **А знаешь ли ты?** Именно поэтому дробь для старинных ружей лили с высокой башни: расплавленный свинец в падении собирался в идеальные шарики поверхностным натяжением и застывал сферами, пока летел. Такие башни (shot towers) сохранились до сих пор.

Почему скрепка и водомерка не тонут

Скрепка стальная, она **плотнее воды примерно в 8 раз**, и по закону Архимеда она обязана тонуть. Но если положить её на воду очень аккуратно (или через салфетку), она лежит. В чём фокус?

Скрепка **не разрывает** плёнку, а **продавливает** её, как ты продавливаешь батут, если сядешь на него. Под скрепкой образуется вмятина. А теперь смотри, что происходит с натяжением по краям этой вмятины: плёнка там наклонена, и сила натяжения плёнки направлена **вдоль наклонной поверхности вверх и в сторону**. У этой силы есть **вертикальная составляющая, направленная вверх** — именно она подпирает скрепку снизу.

Скрепка держится, пока её вес меньше, чем максимальная вертикальная сила, которую может дать плёнка по всему периметру контакта. Оценим эту силу по формуле «сила = натяжение × длина контура»:

$$F \approx \sigma \cdot L,$$

где L — длина контура смачивания (линия, по которой плёнка касается скрепки).

Считаем по шагам. Скрепка длиной около 3 см; плёнка касается её с двух сторон (сверху вдоль и снизу вдоль), поэтому периметр контакта грубо ≈ 2 длины $\approx 2 \times 3 \text{ см} = 6 \text{ см} = 0,06 \text{ м}$. Тогда максимальная удерживающая сила:

- Шаг 1: $F \approx \sigma \cdot L = 0,073 \text{ Н/м} \times 0,06 \text{ м}$.
- Шаг 2: $0,073 \times 0,06 = 0,00438 \approx \mathbf{0,004 \text{ Н}}$.

Теперь вес скрепки. Масса $m \approx 0,4 \text{ г} = 0,0004 \text{ кг}$, $g \approx 9,8 \text{ Н/кг}$:

- Шаг 1: $P = mg = 0,0004 \text{ кг} \times 9,8 \text{ Н/кг}$.
- Шаг 2: $0,0004 \times 9,8 = 0,00392 \approx \mathbf{0,004 \text{ Н}}$.

Сравниваем: удерживающая сила $\approx 0,004 \text{ Н}$ и вес $\approx 0,004 \text{ Н}$ — **они почти равны**. Вот почему скрепка держится буквально «на честном слове»: чуть тронь — утонет.

Водомерка идёт дальше: её лапки покрыты несмачиваемыми (гидрофобными) волосками, вода их отталкивает, и насекомое опирается на плёнку, почти не продавливая её. Каждая лапка создаёт ямку — приглядишься летом к пруду, увидишь тени этих ямок на дне.

⚠ Частая ошибка: думать, что скрепку держит выталкивающая сила Архимеда. Нет! Архимед дал бы силу, равную весу вытесненной воды — а скрепка почти не погружена, вытесняет каплю воды. Держит именно натяжение плёнки, а не выталкивание.

Капиллярность: почему вода лезет вверх по тонкой трубке


Опусти узкую стеклянную трубочку в воду — и увидишь, что вода **сама поднимется** внутри трубки выше уровня в сосуде, будто её кто-то втягивает. Это

капиллярность, и она тоже про натяжение.

Разберём по шагам, откуда берётся подъём.

1. Вода **смачивает** стекло: молекулы воды притягиваются к стеклу сильнее, чем друг к другу. Поэтому у стенок вода «прилипает» и подтягивается вверх, образуя изогнутую вогнутую поверхность (менискок — ямку в середине).
2. Эта изогнутая плёнка натянута и по краю трубки цепляется за стекло. Сила натяжения плёнки направлена **вверх** вдоль стенок по всей окружности трубки. Длина этой окружности $L = 2\pi r$ (где r — радиус трубки), поэтому вверх тянет сила $F \approx \sigma \cdot 2\pi r$.
3. Эта сила поднимает столбик воды, пока не уравнивает **вес** поднятого столбика.

Главный вывод — про толщину трубки. Сила натяжения растёт как **периметр** (пропорционально r), а вес поднятого столбика растёт как **объём** (пропорционально площади сечения πr^2 , то есть как r^2). Чем тоньше трубка (меньше r), тем сильнее «сила на периметр» побеждает «вес по объёму» — поэтому **в более тонкой трубке вода поднимается выше**. Именно так вода поднимается по тонким порам в почве, в бумажной салфетке, в стебле растения.

 **Откуда это в жизни.** Бумажное полотенце впитывает воду по тем же капиллярам — множеству тончайших каналов между волокнами. Чем тоньше канал, тем выше по нему заберётся вода.


Как мыло всё портит

Молекулы мыла (ПАВ — поверхностно-активные вещества) встраиваются в поверхность воды. Устроены они хитро: один конец молекулы «любит» воду, другой «боится» её и торчит наружу. Поэтому мыло охотно скапливается именно на поверхности и **вклинивается** между молекулами воды, мешая им притягиваться друг к другу.

Раз притяжение в поверхностном слое ослабло — ослабла и «плёнка». То есть мыло резко **снижает** σ — примерно втрое, до $\sim 0,025$ Н/м. Плёнка слабеет, её

максимальная удерживающая сила $F = \sigma \cdot L$ падает во столько же раз, скрепка больше не держится и тонет.

Более того, если капнуть мыло с одного края, там σ падает, а с другого края оно ещё большее. Сильная сторона **перетягивает** плёнку на себя (у неё натяжение больше — она «выигрывает перетягивание каната»). Возникает поток от «мыльного» участка к «чистому». На этом основан красивый опыт с убегающим перцем и даже игрушечные «мыльные лодочки», которые сами плывут.

 Эффект неравномерного натяжения называют эффектом Марангони. Его же ты видишь как «слёзы вина» — плёнку на стенках бокала, ползущую вверх из-за разницы натяжений спирта и воды.



Опыт дома

Перец, удирающий от мыла (эффектнее не придумаешь).

Возьми: тарелку с водой, молотый чёрный перец (или блёстки, или щепотку талька), каплю жидкого мыла на палец.

1. Налей в тарелку воду тонким слоем, дай ей успокоиться.
2. Равномерно посыпь поверхность молотым перцем. Крупинки лягут на плёнку и будут плавать (сами по себе они тяжелее воды — их держит натяжение).
3. Коснись центра воды пальцем с каплей мыла.
4. Наблюдай: перец **мгновенно разбегаются к краям**, будто в панике!

Почему: в точке касания σ резко упало. Вокруг натяжение осталось большим и потянуло плёнку (вместе с перчинками) от центра к краям. Ты увидел эффект Марангони своими глазами.

Бонус: скрепка на воде. Положи скрепку на кусочек бумажной салфетки, а салфетку осторожно опусти на воду. Салфетка размокнет и утонет, а скрепка останется лежать на плёнке. Теперь капни мылом с краю тарелки — скрепка тут же провалится.



Разбор примера

Задача. Оцени максимальную массу скрепки, которую ещё удержит водяная плёнка, если контур соприкосновения имеет длину $L = 6$ см. Натяжение воды $\sigma = 0,073$ Н/м.

Решение по шагам.

1. Сначала найдём максимальную силу, которой плёнка может тянуть вверх. Плёнка тянет по всему контуру соприкосновения, а сила = натяжение \times длина контура: $F = \sigma \cdot L$. Подставляем: $\sigma = 0,073$ Н/м, $L = 6$ см = 0,06 м. Считаем: $0,073 \times 0,06 = 4,4 \times 10^{-3}$ Н. (Строго говоря, плёнка тянет с обеих сторон контура и под углом, так что это грубая оценка сверху — но для порядка величины годится.)
2. Скрепка держится, пока эта сила уравновешивает её вес: $F = mg$. Отсюда выражаем массу: $m = F/g$. Подставляем $F = 4,4 \times 10^{-3}$ Н, $g = 9,8$ Н/кг. Считаем: $4,4 \times 10^{-3} / 9,8 \approx 4,5 \times 10^{-4}$ кг = **0,45 г**.

Ответ: около **0,4–0,5 грамма**. Реальная канцелярская скрепка весит $\sim 0,3–0,5$ г — как раз на грани, поэтому опыт и получается «на честном слове».



Задачи

1. Во сколько раз шар меньше по площади поверхности, чем куб того же объёма? (Подсказка: для объёма V площадь шара $S_{\text{ш}} = (36\pi)^{1/3} \cdot V^{2/3}$, а куба $S_{\text{к}} = 6 \cdot V^{2/3}$. Найди отношение.)
2. Оцени силу, с которой плёнка воды тянет за периметр монеты диаметром 2 см, лежащей на поверхности. $\sigma = 0,073$ Н/м.
3. Почему капли масла в воде собираются в шарики, а не растекаются плёнкой? Объясни через стремление поверхности к минимуму.
4. Мыло снижает натяжение воды с 0,073 до 0,025 Н/м. Во сколько раз падает максимальная удерживающая сила плёнки? Утонет ли теперь скрепка из

примера?

5. Оцени, какого максимального размера (длины) может быть насекомое-водомерка, если суммарный периметр опоры её лапок пропорционален её размеру L , а масса — L^3 . Почему крупные животные так ходить по воде не могут? (Качественно.)
6. Тонкая проволочная рамка со стороной 4 см затянута мыльной плёнкой. Плёнка имеет **две** поверхности. Какая сила стягивает подвижную сторону рамки, если $\sigma_{\text{мыла}} = 0,025 \text{ Н/м}$? (Учти обе стороны.)
7. Почему тёплая вода хуже держит скрепку, чем холодная? (Подсказка: с ростом температуры σ воды уменьшается.)
8. В опыте с перцем: куда потечёт плёнка, если капнуть мыло не в центр, а у самого края тарелки? Опиши направление движения перчинок.