

# ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ

Валерия Сирота

## ОТ ХОЛОДНОГО К ГОРЯЧЕМУ И ОБРАТНО: ТЕПЛОЁМКОСТЬ

Если вы читали статью в «Квантике» №2 за 2023 год (а хорошо бы!), то наверняка обратили внимание на похожее название. Речь пойдёт о похожих вещах, но здесь мы обсудим не «тот же процесс наоборот», а «в совсем другую сторону». В той статье у нас тепловая энергия распространялась в пространстве – из одного места в другое. Со временем при этом могло ничего и не меняться: вот батарея постоянно греет комнату, а через стену тепло постоянно «уходит» на улицу. На улице это тепло, конечно, что-то нагревает, но незаметно – уж очень улица большая. Так что мы наблюдаем только поток энергии, переносимой наружу, и при этом – неизменную, неподвижную картинку.

В этот раз будет по-другому: будем смотреть на изменения, происходящие со временем в одном и том же месте пространства. Точнее – на изменения, вызванные накоплением в этом месте тепловой энергии.

Вот простая аналогия: представьте себе людей, которые что-то передают друг другу по цепочке – например, кирпичи. Каждый получает кирпич – и тут же отдаёт дальше, получая следующий: «поток кирпичей» через это место есть, а количество кирпичей в нём не меняется. То ли дело, если кто-то станет складывать все передаваемые ему кирпичи возле себя. «Потока» дальше уже не будет, только «приток» к нему, зато количество кирпичей в этом отдельном месте будет расти.

Если в этой истории заменить слово «кирпичи» на слова «тепловая энергия», в первом случае получится теплопередача (и как раз теплопроводность),<sup>1</sup> а во втором... Нет, ещё не совсем теплоёмкость. Потому что теплоёмкость – это то, как счастливый владелец кучи кирпичей (то есть тепловой энергии) будет всё это использовать. Сложит он их все в штабель аккуратно или как попало? А может, он из них сразу по мере поступления кладку кладёт и раствором скрепляет?

**Что такое теплоёмкость.** Итак, у нас есть какое-то вещество, которому «перепало» снаружи некое ко-

<sup>1</sup> Конвекция в этой модели – это если люди не в цепочке стоят, а группами ходят туда-сюда, одни несут кирпичи в одну сторону, другие – какой-то лишний мусор в другую... А как в этой аналогии будет выглядеть передача энергии излучением? Придётся им кидаться кирпичами...

личество тепловой энергии. Куда денется, на что потратится эта энергия? Конечно, на нагревание этого вещества! Ведь тепловая энергия – это и есть энергия движения молекул. Все молекулы станут двигаться быстрее, и у вещества увеличится температура.

Тут и возникает вопрос об «эффективности» работы «приёмщика кирпичей». Вот передали мы это му веществу столько-то энергии. И что? Насколько выросла температура? Это зависит, конечно, от того, сколько было вещества. Одно дело – нагревать на плите маленькую кастрюльку, а другое – большое ведро. Но даже если ставить на одинаковые плиты одинаковые кастрюльки, а внутрь класть разные вещества – нагреваться они будут с разной скоростью. Например, воздух нагреется намного быстрее воды, а алюминий – чуть медленнее такого же куска стекла.

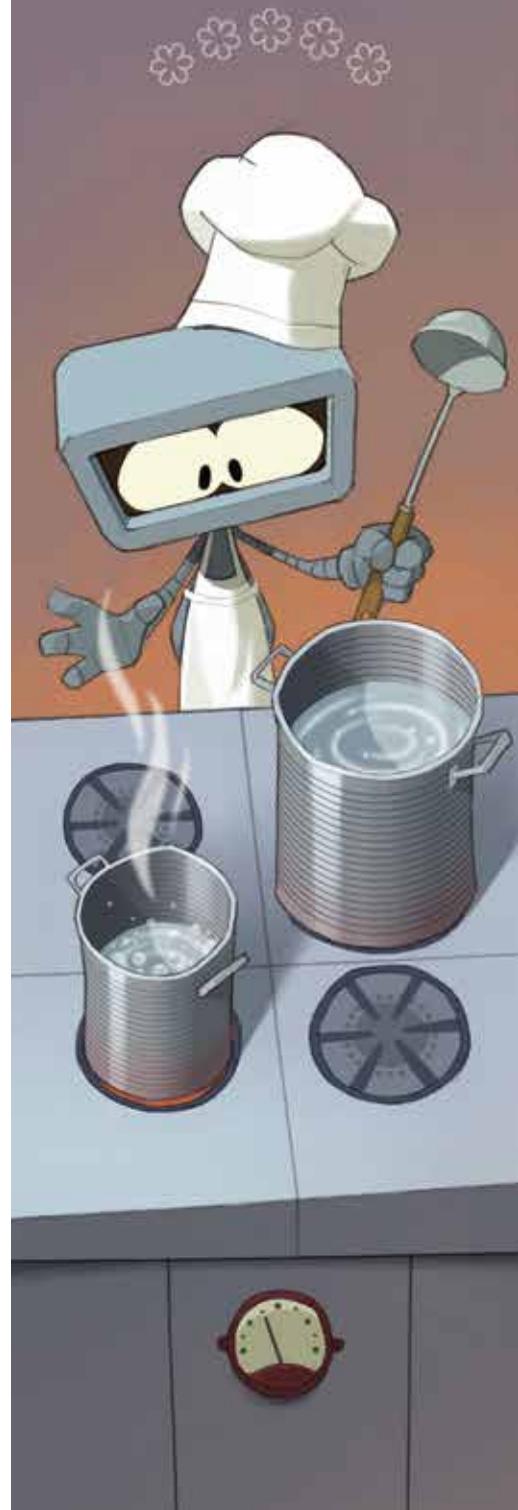
Количество энергии, нужное, чтобы нагреть данное тело на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , называется *теплоёмкостью*. Чем она больше, тем дольше ждать, когда тело нагреется.

**Вопрос 1.** У первого тела теплоёмкость в 2 раза больше, чем у второго. Им передали одинаковое количество теплоты. Второе тело нагрелось на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На сколько нагрелось первое?

Конечно, чтобы сравнивать разные вещества, надо брать стандартные одинаковые «куски». А что считать одинаковым? Можно договориться брать куски одинаковой массы (часто так и делают). Тепло, нужное на нагрев  $1\text{ кг}$  вещества на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , называется *удельной теплоёмкостью*. Но можно сравнивать и куски одинакового объёма (например,  $1\text{ м}^3$ ) – тогда говорят про *объёмную теплоёмкость*. Это совсем не одно и то же, потому что  $1\text{ м}^3$  разных веществ может весить очень по-разному – например,  $1\text{ м}^3$  ваты и  $1\text{ м}^3$  железа!

**Вопрос 2.** У одного вещества и удельная теплоёмкость, и плотность в 2 раза больше, чем у второго. У какого из этих веществ объёмная теплоёмкость больше, во сколько раз? Придумайте общее правило, как из удельной теплоёмкости, зная плотность, получить объёмную теплоёмкость.

Посмотрите на таблицу на с. 20. Заметили? Удельные теплоёмкости разных веществ отличаются гораздо сильнее, чем объёмные. Похоже, есть (нестрогая) закономерность – чем вещество плотнее, то есть чем тяжелее его кубометр, тем легче нагревать каж-



# ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ



дый его килограмм. Объёмные теплоёмкости у всех разные, конечно, но, если не считать газов, различаются всего раза в 3–4. Сравните с разбросом теплопроводностей! И особые свойства металлов тут им никак не помогают: переносить тепло свободные электроны могут быстро, а нагревать всё равно придётся не только электроны, но и всю кристаллическую решётку.

	Теплопроводность Вт/м °С	Теплоёмкость удельная Дж/кг °С	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Теплоёмкость объёмная кДж/м <sup>3</sup> °С
Серебро	430	240	10500	2520
Медь	390	380	8900	3380
Золото	310	130	19300	2510
Алюминий	230	900	2700	2430
Железо	75	450	7800	3510
Чугун	56	550	7000	3850
Лёд	2,3	2100	900	1900
Камень	1,4	800	2200	1760
Стекло	1,15	840	2500	2100
Вода	0,6	4200	1000	4200
Песок сухой	0,3	830	1500	1250
Дерево	0,2	2300	500	1150
Водород	0,17	14300	0,09	1,4
Гелий	0,14	5200	0,173	0,9
Воздух	0,025	1000	1,2	1,2

**Вопрос 3.** Теплоёмкость льда вдвое меньше, чем у воды (см. таблицу). А что можно сказать о теплоёмкости снега?

**Обратимость.** Очень важное отличие теплоёмкости от теплопроводности заключается в том, что нагревание само по себе обратимо по времени, а поток тепла – нет. В природе то и дело какая-то вещь нагревается, а потом обратно остывает. Количество тепловой энергии, запасённой в данном веществе, может и расти, и уменьшаться, в зависимости от того, что вокруг. В пространстве же поток энергии всегда направлен от более горячего к более холодному.<sup>2</sup> Вот представьте себе, что вы сняли кино, как нагревает-

<sup>2</sup> Это закон природы – второе начало термодинамики. Но тут есть одна лазейка. Точная формулировка закона: невозможен процесс, *единственным* конечным результатом которого является передача тепла от более холодного тела к более горячему. Просто так, само по себе, тепло «не в ту сторону» не передаётся. Но если с помощью хитрых приспособлений не только передать тепло, но и совершить при этом работу, то можно всё-таки сделать так, чтобы тепло передавалось от холодного к тёплому – из холодильника в комнату, например.

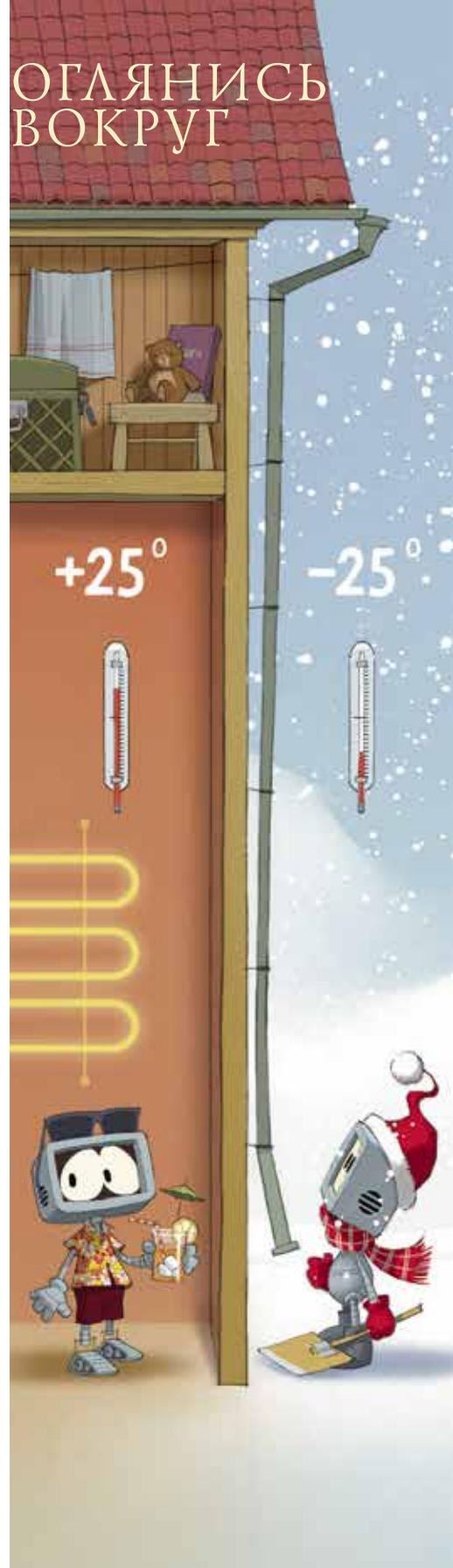
ся вода в кастрюле, регулярно «на камеру» измеряя её температуру. Если вы прокрутите это кино назад, ничего странного на экране не будет: зритель просто подумает, что фильм снят после выключения плиты. А вот если вам покажут кино, где кружка с тёплым чаем стоит в миске с холодной водой, и чай понемногу нагревается, а вода остывает – тут вы сразу поймёте, что это кино «задом наперёд»!

Раз уж обратимость, то по-честному. При нагревании вещество забирает тепло, запасает тепловую энергию; при остывании оно отдаёт её обратно ровно в том же количестве. На этом основан, например, принцип действия грелки. По этой же причине возле моря – мягкий климат: летом оно медленно нагревается (из-за большой теплоёмкости воды), а зимой – медленно остывает, понемногу отдавая запасённую энергию и согревая воздух и берега.

**«А теперь – вдвоём».** В природе оба эффекта часто работают одновременно: тепло частично проводится через вещество, а частично «оседает» в нём, нагревая его. В примере с кирпичами это значило бы, что некоторые люди не все кирпичи передают дальше, а что-то оставляют себе. Та же кастрюля с водой на плите не только берёт тепло на нагрев, но и отдаёт его, нагревая комнату. И теплоёмкость воды работает (греется суп), и теплопроводность (греется комната). И даже, если плита слабая, а кастрюля большая, из-за теплопроводности может случиться, что вода никогда не закипит! Нагреется немножко и перестанет забирать себе тепло, всё будет отдавать дальше.

Как же устанавливается баланс между этими двумя процессами? Это зависит от окружающих (математики и физики говорят – граничных) условий. Например, пусть у нас есть плоская пластина (стенка). Справа от неё поддерживаем постоянную температуру – улица, комната, или вообще лёд приложили. А слева греем её горелкой – подводим постоянный поток тепла. Что будет происходить? Следим за температурой! Время от времени рисуем график (рис. 1 на с. 22): на какой глубине в стене какая температура.

В первый момент вся стенка – одной температуры. Поэтому теплопроводность ещё не включилась –



# ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ

ей ведь нужна раз-  
ница температур.  
Так что всё приходя-  
щее тепло остаётся  
в ближней к горелке  
части стены – и чем  
меньше теплоёмкость,  
тем быстрее оно её  
греет.

Теперь включает-  
ся теплопроводность.

Поток проходящего через стенку тепла зависит от раз-  
ницы температур в соседних точках, на картинке – от  
угла наклона графика  $T(x)$ . Температура левой части  
растёт, в середине и справа она ещё мала – угол накло-  
на увеличивается. Чем он больше, тем больше тепла  
проходит глубже в стенку, тем меньше остаётся на на-  
грев левой части. При некотором наклоне уже почти  
весь поток энергии проходит дальше, левая часть стен-  
ки почти перестаёт греться, нагревается в основном се-  
редина, но и в правую часть уже немного тепла прони-  
кает... В конце концов вся стенка нагрелась, но не до  
одинаковой температуры, а до «одинакового угла на-  
клона  $T(x)$ », график температуры стал прямой линией,  
теперь поток тепла везде одинаковый и максимальный.  
С этого момента всё тепло уходит сквозь стенку.

А чем отличаются эти картинки для стенок из раз-  
ных материалов? Легко разобраться: при одинаковой  
толщине и одинаковом потоке тепла стенка с большей  
теплопроводностью нагреется до меньшей темпера-  
туры, небольшой разницы температур слева и спра-  
ва будет достаточно для протекания тепла (рис. 2).  
А если теплопроводности одинаковы, но разные те-  
плоёмкости – конечное распределение температур бу-  
дет одно и то же, но до нужной температуры быстрее  
нагреется менее теплоёмкая стенка (рис. 3).

Заметим, что в этом примере температура на ле-  
вом краю стенки зависит от материала. Это потому,  
что мы «закрепили» приток тепла, потребовали, что-  
бы он всегда был одним и тем же. Можно сделать и  
иначе: например, регулировать поток тепла (крутить  
кран на батарее), но поддерживать постоянную тем-

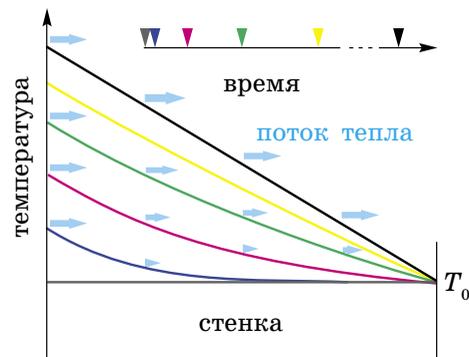
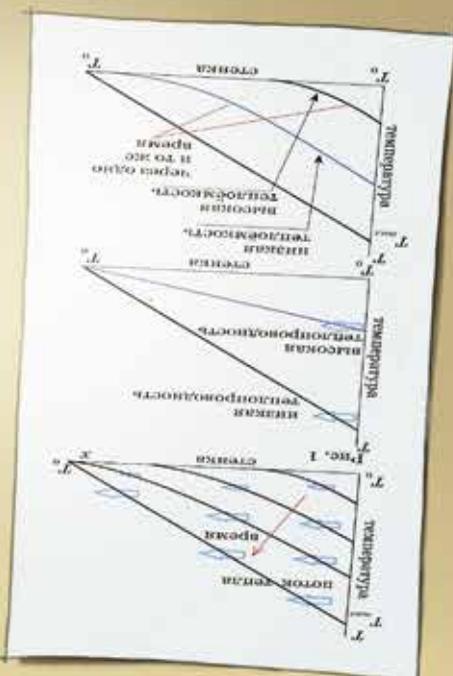


Рис. 1



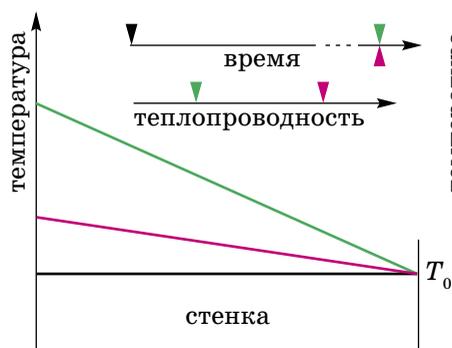


Рис. 2

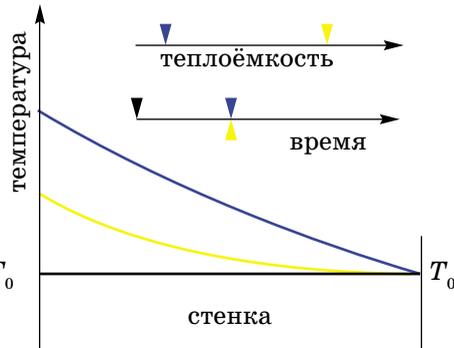


Рис. 3

температуру слева от стенки. Тогда при любой теплопроводности стенки конечное распределение температур будет одно и то же, просто при более теплопроводящей стенке понадобится больший поток тепла от батареи.

**Теплота плавления.** В начале этой статьи есть ошибка. (Интересно, кто заметил?) Там сказано, что энергия, приходящая к веществу, «конечно», потратится на его нагрев. Это не всегда так! Вот я возьму лёд при температуре  $0^\circ\text{C}$  и положу его на плиту – начну подводить к нему тепло. Думаете, он будет нагреваться? Ничуть не бывало! Он будет плавиться, и вся энергия, приходящая к нему, потратится на разрушение связей между молекулами в кристалле, их «освобождение». Даже если воды уже много, но в ней плавает лёд – вода вокруг льдинок не будет греться до тех пор, пока они все не растают. Это позволяет использовать тающий лёд (или любое другое вещество вблизи его температуры плавления) как терморегулятор: обложите продукты льдом, и, пока он весь не растает, продукты будут иметь температуру  $0^\circ\text{C}$ <sup>3</sup> При этом на плавление льда потратится довольно много приходящей снаружи энергии. Энергия, которая нужна для того, чтобы расплавить данный предмет, называется *теплота плавления*. Как и теплоёмкость, она для каждого вещества может быть удельная (энергия на каждый 1 кг) или объёмная (на каждый кубометр). Всё то же самое верно и при переходе веществ из жидкого состояния в газообразное. Нужная на это энергия называется *теплота парообразования*. А ситуации, когда свойства вещества резко меняются без изменения его температуры, называются *фазовыми переходами*.

<sup>3</sup>См. задачу 3 из статьи «Мороз и солнце» в «Квантике» № 12, 2022.



Художник Алексей Вайнер