

## Внутренняя энергия

Темы кодификатора ЕГЭ: внутренняя энергия, теплопередача, виды теплопередачи.

Частицы любого тела — атомы или молекулы — совершают хаотическое непрерывающееся движение (так называемое *тепловое движение*). Поэтому каждая частица обладает некоторой кинетической энергией.

Кроме того, частицы вещества взаимодействуют друг с другом силами электрического притяжения и отталкивания, а также посредством ядерных сил. Стало быть, вся система частиц данного тела обладает ещё и потенциальной энергией.

Кинетическая энергия теплового движения частиц и потенциальная энергия их взаимодействия вместе образуют новый вид энергии, не сводящийся к механической энергии тела (т. е. кинетической энергии движения тела как целого и потенциальной энергии его взаимодействия с другими телами). Этот вид энергии называется внутренней энергией.

*Внутренняя энергия тела — это суммарная кинетическая энергия теплового движения его частиц плюс потенциальная энергия их взаимодействия друг с другом.*

*Внутренняя энергия термодинамической системы — это сумма внутренних энергий тел, входящих в систему.*

Таким образом, внутреннюю энергию тела образуют следующие слагаемые.

1. Кинетическая энергия непрерывного хаотического движения частиц тела.
2. Потенциальная энергия молекул (атомов), обусловленная силами межмолекулярного взаимодействия.
3. Энергия электронов в атомах.
4. Внутряядерная энергия.

В случае простейшей модели вещества — идеального газа — для внутренней энергии можно получить явную формулу.

### Внутренняя энергия одноатомного идеального газа

Потенциальная энергия взаимодействия частиц идеального газа равна нулю (напомним, что в модели идеального газа мы пренебрегаем взаимодействием частиц на расстоянии). Поэтому внутренняя энергия одноатомного идеального газа сводится к суммарной кинетической энергии поступательного<sup>1</sup> движения его атомов. Эту энергию можно найти, умножив число атомов газа  $N$  на среднюю кинетическую энергию  $E$  одного атома:

$$U = NE = N \cdot \frac{3}{2}kT = \nu N_A \cdot \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}\nu RT,$$

или

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT.$$

Мы видим, что внутренняя энергия идеального газа (масса и химический состав которого неизменны) является функцией только его температуры. У реального газа, жидкости или твёрдого тела внутренняя энергия будет зависеть ещё и от объёма — ведь при изменении объёма изменяется взаимное расположение частиц и, как следствие, потенциальная энергия их взаимодействия.

<sup>1</sup>У многоатомного газа приходится ещё учитывать вращение молекул и колебания атомов внутри молекул.

## Функция состояния

Важнейшее свойство внутренней энергии заключается в том, что она является *функцией состояния* термодинамической системы. А именно, внутренняя энергия однозначно определяется набором макроскопических параметров, характеризующих систему, и не зависит от «предыстории» системы, т. е. от того, в каком состоянии система находилась прежде и каким конкретно образом она оказалась в данном состоянии.

Так, при переходе системы из одного состояния в другое изменение её внутренней энергии определяется лишь начальным и конечным состояниями системы и *не зависит* от пути перехода из начального состояния в конечное. Если система возвращается в исходное состояние, то изменение её внутренней энергии равно нулю.

Опыт показывает, что существует лишь два способа изменения внутренней энергии тела:

- совершение механической работы;
- теплопередача.

Попросту говоря, нагреть чайник можно только двумя принципиально разными способами: тереть его чем-нибудь или поставить на огонь :-). Рассмотрим эти способы подробнее.

### Изменение внутренней энергии: совершение работы

Если работа совершается *над* телом, то внутренняя энергия тела возрастает.

Например, гвоздь после удара по нему молотком нагревается и немного деформируется. Но температура — это мера средней кинетической энергии частиц тела. Нагревание гвоздя свидетельствует об увеличении кинетической энергии его частиц: в самом деле, частицы разгоняются от удара молотком и от трения гвоздя о доску.

Деформация же есть не что иное, как смещение частиц друг относительно друга; гвоздь после удара испытывает деформацию сжатия, его частицы сближаются, между ними возрастают силы отталкивания, и это приводит к увеличению потенциальной энергии частиц гвоздя.

Итак, внутренняя энергия гвоздя увеличилась. Это явилось результатом совершения над ним работы — работу совершили молоток и сила трения о доску.

Если же работа совершается *самим* телом, то внутренняя энергия тела уменьшается.

Пусть, например, сжатый воздух в теплоизолированном сосуде под поршнем расширяется и поднимает некий груз, совершая тем самым работу<sup>2</sup>. В ходе такого процесса воздух будет охлаждаться — его молекулы, ударяя вдогонку по движущемуся поршню, отдают ему часть своей кинетической энергии. (Точно так же футболист, останавливая ногой быстро летящий мяч, делает его движение *от* мяча и гасит его скорость.) Стало быть, внутренняя энергия воздуха уменьшается.

Воздух, таким образом, совершает работу за счёт своей внутренней энергии: поскольку сосуд теплоизолирован, нет притока энергии к воздуху от каких-либо внешних источников, и черпать энергию для совершения работы воздух может только из собственных запасов.

### Изменение внутренней энергии: теплопередача

*Теплопередача* — это процесс перехода внутренней энергии от более горячего тела к более холодному, не связанный с совершением механической работы. Теплопередача может осуществляться либо при непосредственном контакте тел, либо через промежуточную среду (и даже через вакуум). Теплопередача называется ещё *теплообменом*.

---

<sup>2</sup>Процесс в теплоизолированном сосуде называется *адиабатным*. Мы изучим адиабатный процесс при рассмотрении первого закона термодинамики.

Различают три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Сейчас мы рассмотрим их более подробно.

## Теплопроводность

Если железный стержень сунуть одним концом в огонь, то, как мы знаем, долго его в руке не продержишь. Попадая в область высокой температуры, атомы железа начинают колебаться интенсивнее (т. е. приобретают добавочную кинетическую энергию) и наносят более сильные удары по своим соседям.

Кинетическая энергия соседних атомов также возрастает, и теперь уже эти атомы сообщают дополнительную кинетическую энергию своим соседям. Так от участка к участку тепло постепенно распространяется по стержню — от помещённого в огонь конца до нашей руки. Это и есть теплопроводность (рис. 1)<sup>3</sup>.

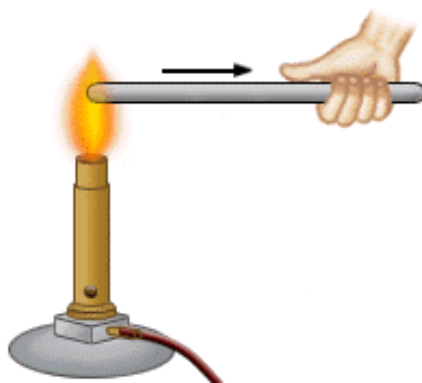


Рис. 1. Теплопроводность

*Теплопроводность — это перенос внутренней энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым за счёт теплового движения и взаимодействия частиц тела.*

Теплопроводность разных веществ различна. Высокую теплопроводность имеют металлы: лучшими проводниками тепла являются серебро, медь и золото. Теплопроводность жидкостей гораздо меньше. Газы проводят тепло настолько плохо, что относятся уже к теплоизоляторам: молекулы газов из-за больших расстояний между ними слабо взаимодействуют друг с другом. Вот почему, например, в окнах делают двойные рамы: прослойка воздуха препятствует уходу тепла).

Плохими проводниками тепла являются поэтому пористые тела — такие, как кирпич, вата или мех. Они содержат в своих порах воздух. Недаром кирпичные дома считаются самыми тёплыми, а в мороз люди надевают меховые шубы и куртки с прослойкой пуха или синтепона.

Но если воздух так плохо проводит тепло, то почему тогда прогревается от батареи комната? Происходит это вследствие другого вида теплопередачи — конвекции.

## Конвекция

*Конвекция — это перенос внутренней энергии в жидкостях или газах в результате циркуляции потоков и перемешивания вещества.*

Воздух вблизи батареи нагревается и расширяется. Действующая на этот воздух сила тяжести остаётся прежней, а выталкивающая сила со стороны окружающего воздуха увеличивается, так что нагретый воздух начинает всплывать к потолку. На его место приходит холодный

<sup>3</sup>Изображение с сайта [educationalelectronicsusa.com](http://educationalelectronicsusa.com).

воздух<sup>4</sup>, с которым повторяется то же самое.

В результате устанавливается циркуляция воздуха, которая и служит примером конвекции — распространение тепла в комнате осуществляется воздушными потоками.

Совершенно аналогичный процесс можно наблюдать и в жидкости. Когда вы ставите на плиту чайник или кастрюлю с водой, нагревание воды происходит в первую очередь благодаря конвекции (вклад теплопроводности воды тут весьма незначителен).

Конвекционные потоки в воздухе и жидкости показаны<sup>5</sup> на рис. 2.

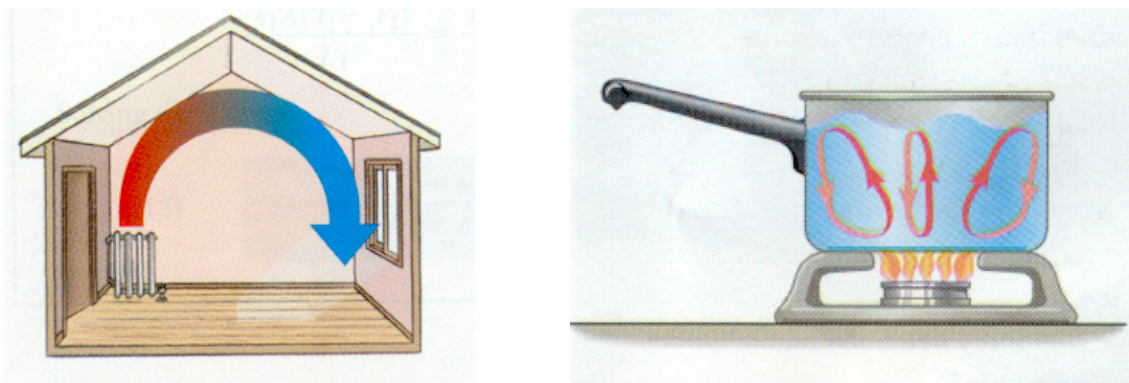


Рис. 2. Конвекция

В твёрдых телах конвекция отсутствует: силы взаимодействия частиц велики, частицы колеблются вблизи фиксированных пространственных точек (узлов кристаллической решётки), и никакие потоки вещества в таких условиях образоваться не могут.

Для циркуляции конвекционных потоков при отоплении комнаты необходимо, чтобы нагретому воздуху *было куда всплывать*. Если радиатор установить под потолком, то никакая циркуляция не возникнет — тёплый воздух так под потолком и останется. Именно поэтому нагревательные приборы помещают *внизу* комнаты. По той же причине чайник ставят *на* огонь, в результате чего нагретые слои воды, поднимаясь, уступают место более холодным.

Наоборот, кондиционер нужно располагать как можно выше: тогда охлаждённый воздух начнёт опускаться, и на его место будет приходить более тёплый. Циркуляция пойдёт в обратном направлении по сравнению с движением потоков при обогреве комнаты.

## Тепловое излучение

Каким образом Земля получает энергию от Солнца? Теплопроводность и конвекция исключены: нас разделяет 150 миллионов километров безвоздушного пространства.

Здесь работает третий вид теплопередачи — *тепловое излучение*. Излучение может распространяться как в веществе, так и в вакууме. Как же оно возникает?

Оказывается, электрическое и магнитное поля тесно связаны друг с другом и обладают одним замечательным свойством. Если электрическое поле изменяется со временем, то оно порождает магнитное поле, которое, вообще говоря, также изменяется со временем<sup>6</sup>. В свою очередь переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, которое опять порождает переменное магнитное поле, которое опять порождает переменное электрическое поле. . .

<sup>4</sup>Тот же процесс, но в куда более грандиозных масштабах, постоянно происходит в природе: именно так возникает ветер.

<sup>5</sup>Изображения с сайта [physics.arizona.edu](http://physics.arizona.edu).

<sup>6</sup>Подробнее об этом будет рассказано в листке про электромагнитную индукцию.

В результате развития этого процесса в пространстве распространяется *электромагнитная волна* — «зацепленные» друг за друга электрическое и магнитное поля. Как и звук, электромагнитные волны обладают скоростью распространения и частотой — в данном случае это частота, с которой колеблются в волне величины и направления полей. Видимый свет — частный случай электромагнитных волн.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме огромна: 300000 км/с. Так, от Земли до Луны свет идёт чуть больше секунды.

Частотный диапазон электромагнитных волн очень широк. Подробнее о шкале электромагнитных волн мы поговорим в соответствующем листке. Здесь отметим лишь, что видимый свет — это крохотный диапазон данной шкалы. Ниже него лежат частоты инфракрасного излучения, выше — частоты ультрафиолетового излучения.

Вспомним теперь, что атомы, будучи в целом электрически нейтральными, содержат положительно заряженные протоны и отрицательно заряженные электроны. Эти заряженные частицы, совершая вместе с атомами хаотическое движение, создают переменные электрические поля и тем самым излучают электромагнитные волны. Эти волны и называются *тепловым излучением* — в напоминание о том, что их источником служит тепловое движение частиц вещества.

Источником теплового излучения является любое тело. При этом излучение уносит часть его внутренней энергии. Встретившись с атомами другого тела, излучение разгоняет их своим колеблющимся электрическим полем, и внутренняя энергия этого тела увеличивается. Именно так мы и греемся в солнечных лучах.

При обычных температурах частоты теплового излучения лежат в инфракрасном диапазоне, так что глаз его не воспринимает (мы не видим, как мы «светимся»). При нагревании тела его атомы начинают излучать волны более высоких частот. Железный гвоздь можно раскалить докрасна — довести до такой температуры, что его тепловое излучение выйдет в нижнюю (красную) часть видимого диапазона. А Солнце кажется нам жёлто-белым: температура на поверхности Солнца настолько высока (6000 °C), что в спектре его излучения присутствуют все частоты видимого света, да ещё ультрафиолет, благодаря которому мы загораем.

Давайте ещё раз взглянем на три вида теплопередачи (рис. 3)<sup>7</sup>.

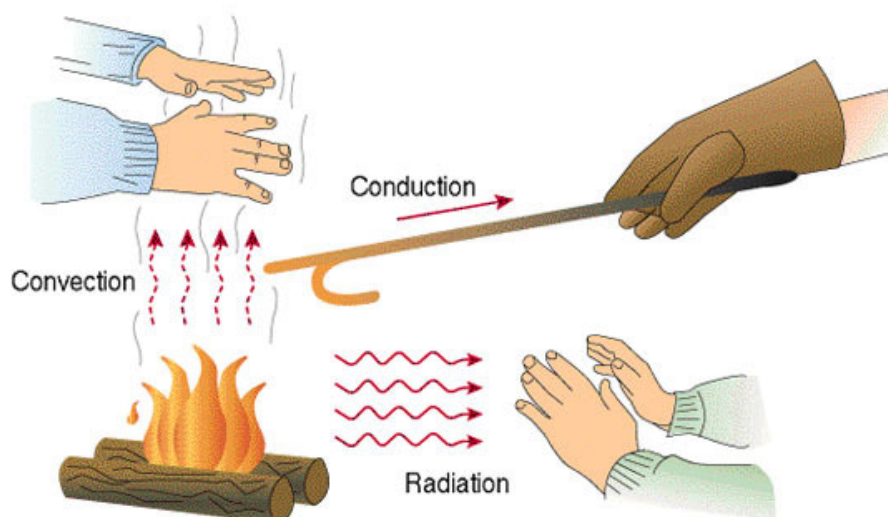


Рис. 3. Три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение

<sup>7</sup>Изображения с сайта [beodom.com](http://beodom.com).