



М.Г. Иванов

# ФИЗИКА КАК СПОСОБ РАЗМЫШЛЯТЬ

Часть первая. Энергия

Учебное пособие для учащихся и учителей  
разных классов средних общеобразовательных школ

Санкт-Петербург, 2012

УДК 372.853  
ББК 74.262.22  
И 20

**Иванов М.Г.**  
**И 20 Физика как способ размышлять. Часть первая. Энергия.**  
Учебное пособие для учащихся и учителей разных классов  
средних общеобразовательных школ . – СПб.: АНПО  
«Школьная Лига», Издательство «Лема», 2012. – 212 с.

*Пособие подготовлено в рамках проекта «Школьная Лига Роснано»*

**Издание выпущено при поддержке  
Комитета по печати и взаимодействию со средствами массовой информации  
Санкт-Петербурга**

**ISBN 978-5-98709-537-9**

«Физика как способ размышлять» — своего рода введение в физику, которым воспользоваться не поздно никогда.

В вопросах, задаваемых автором по ходу книги (а их в ней 285) и ответах на эти вопросы (их несколько меньше), может увлечённо разбираться и заинтересованный семиклассник, и девятиклассник, и абитуриент вуза. Для кого-то из учителей физики или руководителей физических кружков эта книга может стать практическим пособием, а для кого-то — поводом для размышления над целями и возможностями своей преподавательской деятельности.

Книга представляет школьникам и их учителям физику не как область определённых знаний, а как способ взгляда на мир, способ разговора с миром. Этот способ обращён к умению подходить к решению самых разных жизненных задач при помощи построения и испытания мысленных или реальных моделей.

В первой части автор (с читателями) размышляет об Энергии во всём многообразии того, как она проявляется в окружающем нас физическом мире.

Автор книги, М.Г.Иванов – директор и создатель (вместе с Ж.И.Алфёровым) лицея «Физико-техническая школа».

© М. Г. Иванов, 2012  
© АНПО «Школьная Лига», 2012

## Содержание

<i>Предисловие автора</i> .....	5
<i>Благодарности</i> .....	7

### Часть 1. ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА

1. Виды человеческой деятельности .....	11
2. Физика и математика .....	14
3. Что такое физика .....	17
4. Пример работы физика .....	19
5. Метод размерностей .....	24
6. Эксперимент .....	30
7. Границы применимости результата.....	34
8. Оценка .....	37
9. Метод .....	39
10. Физики: теоретики и экспериментаторы.....	40
11. Что изучают физики: Пространство. Время. Материя .....	44
12. Чем пользуются физики в своей работе .....	58
13. Физика состоит из .....	64

### Часть 2. ЭНЕРГИЯ

1. Что такое энергия .....	66
2. Кинетическая и потенциальная энергия .....	72
3. Внешняя и внутренняя энергия.....	78
4. Масштаб энергий .....	86
5. Кинетическая энергия: необязательные подробности .....	88
6. Потенциальная энергия.....	98
7. Соседи, лыжники и размерность.....	106

8. Последовательность действий физика при решении задачи .....	108
9. Гравитационная потенциальная энергия .....	118
10. Электрическая энергия .....	123
11. Переходы энергии.....	126
12. Упругая потенциальная энергия .....	131
13. Принцип минимума потенциальной энергии.....	136
14. Потенциальная кривая .....	139
15. Энергия теплового движения .....	142
16. Тепловая энергия и температура .....	154
17. Разные температуры .....	164
18. Температура как указатель направления .....	170
19. Другие результаты передачи тепловой энергии .....	177
20. Распределение молекул по энергиям .....	187
21. Газы, жидкости, твёрдые тела.....	197
22. Энергия взаимодействия молекул.....	203
23. Энергия внутри молекул и атомов .....	206
<i>Заключение</i> .....	208

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Я давно собирался записать курс физики для тех, у кого это будет первым знакомством с ней (а может быть и последним).

В нашей обыденной жизни на каждом шагу возникают проблемные ситуации: покупать или не покупать? А если покупать, то 10 или 20? А если 20, то нужно брать такси или можно добраться на метро? А если добрался, то демонстрировать домашним купленное или спрятать до Нового года? Иногда ситуации требуют интуитивного решения, но часто — размышлений. Фактически необходимо *моделирование наблюдаемой ситуации* и/или её последствий. И здесь физика даёт сто очков форы таким общепринятым способам развития личности, как математика или, например, история. Потому что создание и оценка модели реально происходящего (плюс, разумеется, эксперимент) — это и есть суть физики.

Именно поэтому я полагаю, что с физикой должны знакомиться все люди, без исключения.

К сожалению, обычный курс физики не в состоянии развить *«модельное мышление»* — у него другие основные задачи, прежде всего, информационные. Поэтому нашей целью было научить читателя «физически» мыслить, т. е. ставить вопросы, наблюдать, искать и находить информацию, пользоваться ею, анализировать, делать выводы.

Как можно научить кого-то мыслить в рамках «физического» разговора? Мы предложили по возможности заменить монолог на диалоги (эффективность подобного подхода впервые продемонстрировал ещё Сократ в четвертом веке до нашей эры). Именно: включение ученика организуется через систему вопросов (и ответов), регулярно возникающих внутри текста.

Вообще говоря, это вовсе и не *курс* физики, в том смысле, что здесь нет привычного набора привычных разделов: механика, теплота и т. п., а многие традиционные понятия даже не упоминаются, многие явления не рассматриваются. Но есть факты и размышления, собранные вокруг сравнительно немногих узловых

понятий (энергия, температура, импульс, поле...), есть попытка продемонстрировать, как работают физики и насколько это может быть успешным.

*Математика* — язык настоящей физики. Поэтому она проходит через весь наш курс. Но это достаточно простая математика: нужно уверенно считать в пределах арифметики, работать со степенями, строить простые графики и т. п. А если читатель с чем-то не знаком или что-то забыл, то ему помогут соответствующие математические *отступления*.

Что касается *эксперимента*, то все предлагаемые нами опыты могут быть выполнены дома и не требуют ничего такого, чего нельзя найти в любом доме после минутного поиска (разумеется, силами всех членов семьи). Наши любимые лаборатории расположены в кухне или в ванной. А многие вопросы связаны с самым любопытным объектом — человеческим организмом.

Замечательная вещь — шахматы. Что может быть полезнее для тренировки ума? А разве не здорово — получать деньги за свою игру (для профессионалов)? А просто удовольствие, которое имеют миллионы любителей, тратя на это всё свободное время? Замечено, что *физика* подобна игре в такие шахматы, правила которых нам неизвестны. И цель такой игры — наблюдая ответные ходы противника (природы), понять эти правила. Представляете, как *это* интересно?

## БЛАГОДАРНОСТИ

Не могу не воспользоваться возможностью поблагодарить людей, впервые испытавших на себе «Физику как способ размышлять» (полностью или частично) в качестве учеников (вынужденных или добровольных) и учителей-волонтеров, а также тех, кто не смог отказать моей просьбе — получив рукопись в подарок, сообщить своё мнение о степени её разумности и, прежде всего, о возможных ошибках и неизбежных погрешностях.

Итак, я **искренне благодарен** учащимся 8-го класса (1995/96 учебный год) лицея «Физико-техническая школа», ученикам выпускного класса школы Arkansas School for Mathematics and Sciences в американском городе Hot Springs, а также их учителям Ирине Люблинской и Брюсу Джонсу (Bruce Jones); учащимся *домашнего класса* в городе Бостон и их учителю — научному сотруднику Массачусетского Технологического Института (MIT) Дмитрию Мосесяну; старшему научному сотруднику Института Лазерной физики Анатолию Шацеву, президенту фонда Best Practice in Education (Нью-Йорк) Питеру Мокси (Peter Moxhay), компьютерному писателю Владимиру Рычкову с сыном, а также госпоже Хиллари Клинтон и академику Жоресу Алфёрову — за внимание к проблемам школьного образования и личную поддержку.

4ΤΟ ΤΑΚΟΣ  
ΦΥΣΙΚΑ

What is really needed is focus and the focus is thinking.  
*Peter Moxhay, nuclear physicist*

- Это ты сам додумался?
- Не то чтобы я умел думать, но иногда на меня это находит.  
*А.А. Милн. «Винни-Пух и все-все-все».*

Для начала хорошо бы разобраться, чем именно мы собираемся заниматься. А то получится, как у классика: «Шёл в комнату, попал в другую...»

**Вопрос 1:** Из какого это классика?

Поэтому попробуем понять, где именно расположена *Физика* на карте под названием...

## 1. ВИДЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*Сколько их?*

Ваши предложения? ... Вот естественный вариант: два вида — умственная деятельность и физическая. Обсудим такое предложение.

**Вопрос 2:** Боюсь, что тут может быть слишком много сложностей. Скажем: куда отнести хирурга? А медсестру? А санитаря? А футболиста? Тренера? (Список может быть продолжен.)

В одном фильме всё человечество символически представлено всего тремя героями. Их там называют Физик, Писатель и Священник. (Если быть точным, священника там называют иначе, другим словом, выдуманным авторами.) Физик — это все те, кто имеет отношение к любой науке или к технике (инженеры, историки, дорожные рабочие...). Писатель обозначает людей искусства (художники, музыканты, модельеры...). А Священник представляет всех, чья профессия связана, прежде всего, с человеческим общением: учителя, продавцы, политики...

**Вопрос 3:** Куда отнести врача-стоматолога? Архитектора? Водителя автобуса? Учителя физики?

Интересно, если бы физик, писатель и священник на самом деле сошлись вместе, — что могло бы стать темой их общего разговора?

**Вопрос 4:** Не было ли в истории известного вам человека, который совместил в себе все три занятия? ... Так сразу и не вспомнить.

Итак, физика — это нечто из области науки и техники. Можно попытаться уточнить: отделить науку от техники.

**Вопрос 5:** Как это сделать? Чем они принципиально отличаются? Возможно ли это?

Кстати, знаменитый американский физик и, возможно, не менее знаменитый *учитель физики* Ричард Фейнман (Richard P. Feynman) как-то сказал: «...не всё, что не наука, уж обязательно плохо. Любовь, например, тоже не наука».\*

Обычно все науки делят на *естественные* и *гуманитарные*. Физика, как вы знаете, относится к *естественным* наукам. Вместе с биологией, химией, астрономией...

**Вопрос 6:** Назовите ещё хотя бы одну *естественную* науку.

**Вопрос 7:** В чем же это их *естественность*?

**Ответ 7:** Естественные науки занимаются тем, что естественно, т.е. природой (мёртвой и живой). Они её описывают (на своём языке), изучают и даже что-то предсказывают: что должно наблюдаться.

Если залезть в энциклопедический словарь, то там можно найти другое деление, другую классификацию: *система наук условно делится на естественные, общественные и технические*. Общественные науки делают (или, точнее, должны делать) с обществом людей то же самое, что естественные делают с природой. Технические науки мы с вами кратко назвали техникой.

**Вопрос 8:** Куда же девать математику? Ведь в природе нет ни чисел, ни точек, ни прямых, ни произведений, ни уравнений... Может это и не наука вовсе? (Вспомните замечание Фейнмана.)

**Ответ 8:** Действительно, математика стоит особняком: она, конечно, не гуманитарная, но и не естественная. Она — *сама по себе*. Более того, она объединяет вокруг себя некоторые другие науки — и тогда про них говорят — это *точные* науки.

Но в обычном смысле слова физика — вовсе не точная наука. Ровно так же мы говорим: — Приду в семь вечера? — Точно? — Точно! И приходим, например, в 7:35 или в 7:31, или даже в 7:30 с секундами. В последнем случае все согласятся — мы были точны. Но мы не можем прийти точно в буквальном смысле этого слова, то есть *абсолютно точно*. Почему? Потому что мы приходим по часам, а любые часы врут (сильно или слабо). Точно такая ситуация в физике. Её относят к точным наукам, просто потому, что ответы на её главные вопросы даются на языке математики. «Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на

него, и обратно пропорционально массе тела». «Энтропия замкнутой системы не убывает». «Сила тяготения одной материальной точки к другой обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними». Это всё примеры физических законов. Говорят, что физика изучает *количественные* закономерности.

**Вопрос 9:** Приведите пример неколичественной, т.е. *качественной*, закономерности.

**Вопрос 10:** История — точная наука или нет? А медицина?

Итак, объект внимания физика — это природа\*, и, прежде всего, неживая природа. А как же мы с вами? Это уже владения биологии? Не совсем. Конечно, биология как раз и занимается живыми организмами — людьми, животными, насекомыми, растениями. Но часто бывает так: биолог приходит в гости к физику или физик — к биологу. Тогда они пьют чай (?) и занимаются *биофизикой*. Это тоже физика? Да! Но дело не в названии. Просто объект исследования — биологический (живые организмы), а методы работы (измерения, вычисления, закономерности) — из физики. Такие пересечения, работа на стыке наук — вполне обычное дело.

\* Фейнмановские Лекции по Физике, том 1 (The Feynman Lectures on Physics).

\* Греческое слово *physics* как раз и означает *природа*.

## 2. ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

Кругом все считают их ближайшими родственниками. Ещё считают, что они, как всякие члены одной семьи, живут ужасно дружно... А на самом деле? А на самом деле им, конечно, очень сложно, практически невозможно жить друг без друга.

Когда физик Ньютон стал решать задачу — найти путь, пройденный экипажем (дело происходило в 17-ом веке), который движется с меняющейся скоростью, то он обнаружил, что математики ещё не придумали подходящего, необходимого для решения такой задачи, аппарата. Обычных действий — умножения, вычитания, даже возведения в степень или извлечения корня — не хватало. Пришлось частично придумывать самому, частично — ставить задачу чистым математикам (и математик Лейбниц «откликнулся» на его призыв). Так бывало не раз в истории науки: самые передовые физики фактически вынуждали математиков придумывать новый математический аппарат, вводить новые разделы математики (или делали это сами — тогда их потом именовали физиками и математиками).

Но бывали и обратные случаи: когда уже имевшиеся математические результаты помогали делать открытия физикам. Так было с созданием общей теории относительности: как оказалось, для выражения идей физика Эйнштейна уже существует подходящий математический аппарат — геометрия Римана. (Здесь физику помог его друг-математик, который в силу своего образования был знаком с теорией римановых пространств.)

Короче, *физика — это главная причина возникновения новой математики*. Так считают все нормальные люди (кроме, разумеется, математиков)\*.

Итак, физика и математика, мягко говоря, помогают друг другу. Физика без математики, *к сожалению*, не может сказать ни слова (физического слова!). А математика обретает смысл для людей в основном благодаря физике. Можно сказать, что *математика — способ выражения идей физики*.

(Математики, конечно, с этим не согласны.)

Но! Физика и Математика — совсем разные. (Это бывает довольно часто: даже очень разных, почти противоположных

людей тянет друг к другу; другой пример: как мы ещё увидим, электрические заряды противоположного знака тоже притягиваются!)

Вот простой пример: сколько будет — один плюс один? Если обойтись без некоторых оговорок, то математик скажет: два. А физик возьмет пипетку, наберет в неё воду, капнет на стёклышко каплю — одну, а потом ещё одну, потом наклонит стёклышко — и они сольются; вывод :  $1 + 1 = 1$  ! Вот так.

Но главное — у них *разные «правила игры»*.

В математике *правильно* — значит, все выводы из принятых аксиом логически безупречны и не противоречат друг другу. В математике необходимо исследовать все логически возможные варианты, не оглядываясь на то, бывает ли такое в реальном мире или нет. С точки зрения математика ответ в задаче о количестве пойманных рыб — минус три рыбы — столь же важен, как и «нормальный» ответ — плюс три рыбы.

Другое дело — физика. Здесь правильно — значит совпадает с результатом опыта, эксперимента. *Минус три рыбы* не может быть правильно, потому что никто и никогда не наблюдал такого улова!

**Вопрос 11:** Можете ли вы придумать какую-нибудь искусственную ситуацию, но в принципе возможную, которая позволяла бы считать улов «минус три рыбы» возможным?

Кто-то сказал так: «Математика стремится установить *все* возможные истины, а физика — только *одну*».

**Вопрос 11а:** Какую?

**Ответ 11а:** Ту, которая реализуется в природе, а мы имеем возможность это наблюдать, ставя эксперимент.

Итак, *физика — наука экспериментальная*.

Математик, даже если он занимается, как говорят, прикладными задачами, пришедшими из физики или биологии, берётся за решение только таких проблем, которые не требуют дополнительных, недоказанных предположений.

А физик, как правило, имеет дело с задачами, в которых имеющихся доказанных данных недостаточно для решения.

\* А вот академик Арнольд (математик!) считал свою науку частью физики.



Его искусство состоит в том, чтобы угадать, какие недостающие соотношения на самом деле реализуются в природе. Для таких догадок требуется не математическая, а физическая интуиция.\*

**Вопрос 12:** *Задача.* С какой скоростью должен ехать автомобиль, чтобы доехать из Петербурга в Москву за час? Приведите варианты решения Математика и Физика.

**Ответ 12:** *Математик.* Так как от Петербурга до Москвы 700 км (справочник), то скорость автомобиля будет  $V = 700 \text{ км} / 1 \text{ час} = 700 \text{ км/ч}$ . Это и есть ответ.

*Физик.* Не может автомобиль за час доехать от Питера до Москвы, так как обычные автомобили неспособны развить такую скорость (700 км/ч), а для гоночных машин-рекордсменов трасса Петербург–Москва не приспособлена. Ответ Физика: не существует такой скорости, по крайней мере, на сегодняшний день.

А ещё рассказывают такую *историю*... Однажды Физик и Математик летели на самолёте из Петербурга в Москву. День был безоблачный, и, пролетая над Валдаем, — это примерно на полпути — они увидели где-то внизу пасущуюся синюю овцу. По прилёте в Москву они написали отчеты про увиденное.

*Физик:* на Валдае водится синяя овца.

*Математик:* где-то между Петербургом и Москвой водится овца, синяя сверху.

Итак, **физика — наука точная:** ответ на её главные вопросы даётся на языке математики.

Но следует отчётливо понимать и помнить, что у физики и у математики — разные цели, разные способы их достижения и главное — **разные правила**, по которым можно достичь результата.

**Физика — наука экспериментальная.** В ней «правильный ответ» — это ответ, совпадающий с результатом эксперимента. И только!

---

\* Говорят, что за «физические» способности человека отвечает то же полушарие его мозга, что и за его способности в искусстве. А, например, умение считать (говорят) лежит в другом полушарии. Так что, если у вас что-то не идёт, значит здорово получится что-то другое.

### 3. ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА

Объявляется конкурс на лучшее определение Физики. Для затравки я тут кое-что приготовил:

*Физика — это то, чем занимаются физики в свободное от работы время, сидя дома за чашечкой кофе* (определение принадлежит японскому физики Риого Кубо).

Правда, к такому заманчивому определению я бы добавил вот что:

**Вопрос 13:** Чем физик-профессионал отличается от физика-любителя?

**Ответ 13:** Очень просто: профессионал каждое утро, независимо от своего настроения, садится за ... (компьютер, рабочий стол, экспериментальную установку — *вставить нужное*) и старается честно делать дело. А любитель делает это, если есть настроение (иногда, правда, он может сутками не вставать из-за стола или не отходить от приборов).

Я знаю немало малоизвестных физиков-профи, и заметное число профессоров-любителей (в указанном мной смысле). Правда, большинство любителей почему-то уверены, что они-то как раз профессионалы.

**Вопрос 14:** Почему они так думают, как вы думаете?

А вот известное определение, данное академиком Львом Арцимовичем:

*Физика — это лучший способ удовлетворения своего любопытства за чужой счёт (государства, фирмы, университета...).*

Если бы у нас было побольше времени, мы могли бы обсудить взаимоотношения Физики и Общества, но будем осмотрительны — ведь мы ещё и не начали заниматься собственно физикой, мы всё ещё продолжаем выяснять, *чем именно* мы будем заниматься.

Если честно, тут у меня возникает большое желание сказать вам:

*Физика — это то, чем мы будем заниматься.*

Вот такое *рабочее* определение.

— У вас есть другие варианты?

Зато они есть у Математика:

*Физик — это тот, кто считает, что число 60 делится на все числа — попробуем 1 — делится, 2 — делится, 3 — делится, 4 — делится, 5 — делится, 6 — делится! Для проверки возьмём несколько чисел наугад: 10 — делится, 20 — делится, 30 — тоже делится!*

(Взято из прекрасной книжки Поёя «Математика и правдоподобные рассуждения», она давно переведена на русский язык.)

Если вы не до конца поняли эту шутку — вернитесь в предыдущий параграф.

На самом деле Американский институт физики умудрился дать *определение Физика*. Вот оно:

*«Физиком является тот, кто использует своё образование и опыт для изучения и практического применения взаимодействий между частицами и полями в области механики, акустики, оптики, тепла, электромагнетизма, атомной структуры и ядерных явлений».*

Громоздко и не очень понятно, правда? Но отложим нашу окончательную оценку до лучших времен, когда мы будем кое-что знать про *всё такое*.

А вот определение гораздо более сухое, но оно нравится мне своей определённой (простите за каламбур), своей точностью:

***Физика — наука, изучающая наиболее простые и наиболее общие явления природы.***

Именно наиболее *простые* (движение пули или Луны, или капли дождя, но не движение нетрезвого человека). И именно наиболее *общие* (такие, которые происходят с любой пулей данного типа, а не с личными пулями Джеймса Бонда, которые он как-то по-особому подпиливает).

## 4. ПРИМЕР РАБОТЫ ФИЗИКА

Представьте себе, что однажды к Физикам пришел Важный Человек (*ВЧ*) и сказал вот что. «Много раз назначал я встречи разным другим *ВЧ*. И каждый раз они приходили то раньше, то позже меня. Очень это неудобно. Слышал я, что в заморских странах есть диво дивное — называется часы. И служит оно для отсчёта времени. Вот и подумай: как бы и нам такое заиметь. Даром что ли мы тебе (*Физику*) столько денег платим?»\*

И пришлось Физикам, вместо радовавших его душу наблюдений за Луной и звёздами, заняться вполне земной, прикладной задачей: поиском (у себя в голове) идеи часов. Конечно, сегодняшний физик в такой ситуации первым делом побежал бы в библиотеку — посмотреть заморские журналы или, скорее всего, полез бы в Интернет на сайт [watch.com](http://watch.com) или [watch.edu](http://watch.edu) ...

**Вопрос 15:** А что стали бы делать вы в такой ситуации?

Если искать в Интернете, то какова была бы последовательность ваших действий?

Честно говоря, первые часы с маятником появились давно...

**Вопрос 16:** Примерно когда? (Речь идёт не о солнечных, а именно о маятниковых, механических часах.) Поищите такую информацию.

Но, скажем прямо, это было задолго до рождения первого человека, которого с лёгким сердцем можно было уже назвать Физиком.

**КИС'О 1** (Краткое ИСторическое Отступление)

По-настоящему *наука* на Земле началась, можно сказать, с *Фалеса* из греческого города *Милет*, примерно за шесть сотен лет до Рождества Христова.

**Вопрос 17:** Это было до Гомера или после?

---

\* Это шутка!

Именно там и тогда люди начали задавать себе *общие* вопросы. И появляется *Философия*. Появляется первая школа ученых-философов — в Милете. Они сумели поставить такой неожиданный и до сих пор актуальный вопрос — *из чего состоит материя?* — и размышляли над этим вопросом. (Утверждают, хотя это и сомнительно, что Фалес первым обосновал теорию подобия треугольников...) Все философы из Милета были люди, занятые очень практическими вещами. Можно сказать, что они занимались не просто философией, а *натуральной философией, натурфилософией* (сравни английское *nature* — природа). Позже (но тоже, как говорится, в *Древней Греции*) были *Демокрит* с его идеей — все тела состоят из движущихся атомов (даже душа!) и *Аристотель* из Афин — он выдвинул теорию того, что такое цвет, верно объяснил происхождение звука, создал (неверную!) теорию движения тел, а она считалась верной в течение почти 2000 лет! Всё это время в физике был некоторый перерыв, точнее, она как бы размышляла: рождаться или нет. И длилось это, как мы уже сказали, две тысячи лет!\* Современникам Аристотель был более известен как личный учитель Александра Македонского. А первым физиком в современном смысле слова стал *Галилео Галилей*. Он много чего сделал, открыл первый закон классической механики, но, возможно, главное — он первым сформулировал основное правило игры в физике: *критерий истины — только опыт*. Это было где-то в районе 1600 года в итальянском городе Падуя. А уже потом были Ньютон, Фарадей, Максвелл, Эйнштейн, Бор... Но первым был Галилей.

*Конец отступления.*

Итак, как прийти к идее механических часов? Не знаю! Но сама **ИДЕЯ** понятна и вроде бы лежит на поверхности: использовать что-то повторяющееся, какой-то повторяющийся процесс (природный или легко организуемый).

(По поводу идеи, лежащей вроде бы на поверхности, — известное замечание: всякая идея проходит три стадии: первая — *ну и чушь!*, вторая — *в этом что-то есть...*, третья — *кому же это не очевидно?!*)

Что же повторяется? Посещение школы? Закат и восход? Полнолуние? А что-нибудь происходящее почаще? Собственный пульс? (Если, конечно, не нервничать.) Может, идея использовать маятник пришла в голову Гюйгенсу, когда он наблюдал за качанием детской люльки? (Дело было в 17-ом веке, люльки, говорят, использовали не только на Руси, но даже в передовой Голландии.)

## КИС'О! –2

Сначала идея применить маятник в часах пришла в голову Галилею. Во время богослужения в Пизанском соборе он почему-то следил не за службой, а за тем, как раскачиваются на длинном подвесе лампы. Время он измерял, кстати, по своему пульсу... Гюйгенс, создавший в 1657 году маятниковые часы и запатентовавший это изобретение, всегда отрицал, что знал о проекте Галилея. Дело в том, что отец Гюйгенса был секретарём принца Оранского и участвовал в международных переговорах, где с противоположной стороны был Галилей. Переговоры шли долго, с обедами и приёмами. Очень вероятно, что Галилей не удержался и рассказал секретарю о своей идее, ведь так хочется поделиться с кем-нибудь своим открытием!

*Конец отступления.*

Итак, *есть идея* — использовать маятник для измерения времени. Как? (С этого момента мы, *размышляя, вычисляя и записывая*, начинаем создавать предварительный план, первую **теорию** того, что нас интересует.) **НАБЕРЕМСЯ ТЕРПЕНИЯ!** (Это совершенно необходимое качество для любого, кто занимается любыми исследованиями; утешает то, что обычно оно развивается по ходу занятий.)

Каким образом нечто, связанное с качанием маятника, даст нам промежуток времени между двумя событиями (я вышел из дома — я вернулся домой)? *Что* могло бы быть самым главным в описании качаний маятника? Размах колебаний? Но нам нужно что-то, что можно легко связать со временем! Тогда это, наверно, *период колебаний T* — время, за которое происходит ровно одно колебание, т.е. маятник возвращается обратно, туда, откуда он стартовал. И если этот период *не меняется* на протяжении всего интересующего нас времени, то всё очень просто. Пусть за интересующее нас время *t* произошло *n* качаний маятника. Тогда  **$t = nT$** . Значит, нужно запустить (толкнуть) маятник в тот момент, когда

\* Подробнее про философов и философию (вдруг кто заинтересуется) см., например, совсем не скучную книгу Бертрانا Рассела «Мудрость Запада».

событие, продолжительность которого вы измеряете (выход из дома), и считать число его колебаний до момента окончания события (вы вернулись домой). Понятно, что это ещё не часы, но самое главное в этой простейшей модели мы, кажется, *зацепили*.

Но это все — «если». *Если период  $T$  не меняется в течение всего времени  $t$* . Это во-первых. Можно так считать? Ответ может дать только эксперимент. Но ещё до его начала можно *предположить*, что если трение в точке закрепления подвеса будет не слишком большим, а колебания происходят в воздухе, а не в сметане (т.е. сопротивление окружающей среды мало), и ещё само подвешенное тело, скажем, не валенок, а, например, гирька, то период не должен сильно меняться! Особенно если время от времени маятник подкачивать. (Как? Но это уже следующий вопрос. Ответ: пружиной!)

Но есть и более серьёзное опасение: не зависит ли *период* колебаний от *размаха* колебаний маятника? Это было бы не очень хорошо для часов — потому что...

#### Вопрос 18: Почему?

Но и этот вопрос решается экспериментом: что он (эксперимент) покажет, то и есть.

...Но — как измерить период? Через период другого маятника? А самый первый?

Может период сам зависит от чего-нибудь легко измеримого?

А правда, *от чего может зависеть  $T$*  в принципе?

Ну, например, от длины маятника  $L$ . Может? В принципе может! Ещё? От массы подвешенного груза  $m$ ! Возможно... Ещё? От температуры! Какой? Воздуха, в котором происходят колебания. Хорошо, включим в список и температуру. Ещё?

Есть ещё мнение, что  $T$  должен зависеть и от тяготения Земли. Да?!

Да. Ведь почему отведённый из положения равновесия маятник «падает» обратно? Потому что его Земля туда тянет! Он, конечно, упал бы вертикально вниз, если бы не нить. Вот и получается, что скорость «падения» маятника должна зависеть от степени притяжения к Земле. А больше скорость — меньше время «падения». Итого: время одного колебания, т.е. период  $T$  должен зависеть от какой-то характеристики тяготения Земли. От какой? Не знаем! Поэтому обозначим нашу незнакомку буквой  $g$  (от слова *гравитация* — тяготение) и скажем:  $T$  вроде должен зависеть от  $g$ .

#### Вопрос 19: Почему «вроде»?

**Ответ 19:** Потому что, несмотря на все логические доводы, если опыт покажет, что это не так, — придётся признать: извините, но  $T$  не зависит от  $g$ !

Не забудем и возможную зависимость от размаха колебаний, то есть, например, от угла отклонения нити от вертикали  $\alpha$ .

Подведем *некоторые итоги*. Период колебаний маятника *зависит от* (математики говорят «*является функцией*») следующих величин:  $L, m, g, t^\circ, \alpha \dots$  Многозначие означает нашу неуверенность в том, что этот список закрыт. Кстати, на языке математики эту гипотезу, эту зависимость, эту модель можно записать очень компактно (одно из достоинств математики как языка физики — это краткость изложения информации):

$T = f(L, m, g, t^\circ, \alpha \dots)$  — период  $T$  является функцией от  $L, m, g, t^\circ, \alpha \dots$

Сами величины  $L, m, g, t^\circ, \alpha \dots$  обычно называют *параметрами* (в данном случае — параметрами колебаний маятника). Впрочем, все эти термины не обязательно знать и помнить, но это удобно — например, при чтении разных книг. И потом вы всё равно к ним постепенно привыкните.

#### Вопрос 20: Чья сестра краткость?

Варианты: а) молчаливости; б) торопливости; в) безграмотности; г) таланта.

Что дальше?

Вообще-то — *эксперимент*: надо сделать маятник и начать экспериментировать — проверять, действительно период  $T$  зависит от такого, такого и такого *параметра* колебаний или нет, выяснять вид этой зависимости (чем больше — тем больше? прямо пропорционально? обратно пропорционально? ещё как-то?). Грубо говоря, если, скажем, длину нити увеличить в два раза, то во сколько раз изменится период  $T$ . Потом — то же самое с другим подозрительным параметром, например, с массой груза: зависит ли, если да — то как....

Но можно существенно облегчить работу физика-экспериментатора — сузить список подозрительных параметров ещё до начала эксперимента. Для этого существует замечательная штука, которая называется...

## 5. МЕТОД РАЗМЕРНОСТЕЙ

**Вопрос 21:** Что бы это могло быть, исходя из названия?

Вот типичное математическое равенство:

$$x^2 - 3 = 2(x + 4)^*$$

А вот «физическое» равенство:

$v = s/t$ , т. е. скорость = расстояние/время,  
например,  $10 \text{ м/с} = 20 \text{ м} / 2 \text{ с}$ .

Чем они отличаются с первого взгляда? А вот чем:

- в физике величины имеют *размерность*: метры, секунды, метры в секунду и т. д.;
- размерность левой части равенства = размерность правой части.

**Вопрос 22:** Предположим, у вас случилось затмение памяти, и вы забыли формулу, которая связывает между собой скорость  $v$ , расстояние  $s$  и время  $t$ . Как легко установить правильную формулу?

**Вопрос 23:** А бывают физические величины без размерности, *безразмерные величины*? (Бывают же безразмерные перчатки...)

**Ответ 23:** Все физические величины получаются (или хотя бы в принципе могут быть получены) в результате *измерения*.

А *что такое измерение* (например, длины или температуры)? Мы берем измерительный прибор (линейку или термометр) и с его помощью *сравниваем* измеряемую величину (длину отрезка или температуру тела) с величиной, принятой за единицу (расстоянием между двумя рисками на линейке, принятым за 1 метр или за 1 см; или с температурой, принятой за 1 градус).

А что значит *сравнить* величину с единицей измерения? Это значит выяснить, сколько выбранных единиц содержится в измеряемой величине (10 см или 20 градусов).

А как это выяснить? Для каждой физической величины имеется свой *рецепт* сравнения (т. е. измерения этой величины). Например, известен

\* Между прочим, знаете, как выглядело подобное равенство, скажем, 500 лет назад? «Вещь в квадрате, от которой отнимают три, равна удвоенной сумме этой вещи и четырёх». Именно так — примерно такой набор слов вместо написанного нами равенства. Мы ещё поговорим о роли сокращений и об удобных обозначениях.

рецепт измерения длины (расстояния): прикладываем линейку, совмещаем «ноль» с началом отрезка и смотрим, какая риска (с каким числом) расположилась против его конца.

Для измерения температуры есть свой рецепт, свой — для силы и т. д.

Итак, любая физическая величина имеет свою размерность просто потому, что она (величина) *задается* по существу *рецептом* (процедурой) своего измерения плюс выбором единиц измерения.

**Вопрос 24:** Обсудите эту мысль на примере какой-нибудь не очень приятной вам величины (например, возьмите температуру).

**Вопрос 25:** А собственно говоря, почему 5 груш не могут быть равны 5 яблокам?

А теперь поясним суть метода размерностей на примере — причём, на математическом примере.

### 5.1. ВЫВОД ФОРМУЛЫ ПЛОЩАДИ КРУГА

Согласитесь, что данный круг полностью определяется единственным параметром — его радиусом  $R$ . Измените радиус — и у вас получится уже другой круг, другой площади  $S$ . И наоборот: невозможно нарисовать два круга разного радиуса, но одинаковой площади. Правда?

Запишем этот факт математически кратко:

$$S_{\text{круга}} = f(R)$$

Теперь решающий момент метода. Площадь круга выражается не просто числом — 10, 100, 314... — а числом с указанием единиц измерения: 10 квадратных метров или 100 квадратных сантиметров. Запишем это так:

$$[S] = \text{м}^2$$

размерность площади (круга) — это метры в квадрате.

Но тогда (*внимание!*) мы имеем право написать, что

$$S = kR^2.$$

Здесь  $k$  — постоянный коэффициент, вполне определённое число — одно и то же для любых радиусов  $R$  и соответствующих им площадей  $S$ . Математики говорят так:  $S$  прямо пропорционально  $R$ , а  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Итак, исходя из того, что выражения слева и справа от знака равенства должны быть выражены в одних и тех же единицах, иначе — иметь одну и ту же размерность, мы получили формулу для подсчёта площади круга. Правда, не совсем получили. Ведь мы не знаем значения коэффициента  $k$ . Верно! Метод размерностей даёт возможность определить *вид зависимости* между величинами (у нас — квадратичная зависимость), но *не даёт значения коэффициента пропорциональности*. Как говорят, мы можем найти  $S$  с точностью до коэффициента.

**Вопрос 26:** Как вы полагаете, имеет ли смысл получать такие неопределённые ответы? Стоит обсудить.

(Откроем тайну: на самом деле наш  $k = \pi \approx 3,14$  — это можно показать из других, не размерных соображений, и пусть это сделают математики, если ещё не сделали.)

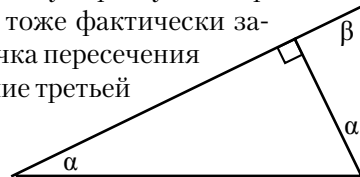
**Вопрос 27:** Если вы не против, попробуйте получить методом размерности формулы для вычисления объёма куба, цилиндра, конуса. Разумеется, с точностью до некоторого коэффициента.

## 5.2. ПРИМЕР № 2: ВЫВОД ТЕОРЕМЫ ПИФАГОРА

Возьмем прямоугольный треугольник и опустим из его прямого угла перпендикуляр на гипотенузу. Получили два треугольника: 1 и 2. Очевидно, что площадь большого треугольника складывается из площадей треугольников 1 и 2:

$$S = S_1 + S_2 \quad (*)$$

В большом треугольнике: его площадь  $S$  однозначно определяется, если задать гипотенузу  $c$  и угол  $\alpha$ . В самом деле: возьмём лист бумаги (возьмите на самом деле!) и проведём на нём горизонтальный отрезок выбранной длины  $c$ . Из левого его конца проведём прямую под заданным углом  $\alpha$  к нашему отрезку. А из правого конца тоже проведём прямую, под тоже фактически заданным углом  $\beta = 180^\circ - 90^\circ - \alpha$ . Точка пересечения этих двух прямых даст нам положение третьей вершины треугольника.\*



\* Вы, наверно, помните, что сумма углов внутри любого треугольника равна 180 градусам.

Чему же равна площадь большого треугольника? **Понятно, что по размерности она совпадает с квадратом гипотенузы  $c^2$ .** Но (*внимание: ключевое место!*) мы выяснили, что  $S$  зависит ещё и от  $\alpha$ . Это нужно учесть в формуле для  $S$ , но как? Сам угол размерности не имеет, поэтому любую комбинацию этого угла (например,  $\alpha^2$  или  $1/\alpha$ ) нельзя прибавлять или отнимать от  $c^2$ . Иначе у нас будет запрещённая формула типа  $S = c^2 + f(\alpha)$ . Здесь  $f(\alpha)$  — какая-то комбинация, какая-то функция от  $\alpha$ .

**Вопрос 28:** Почему такая формула запрещена?

**Ответ 28:** По *правилам игры* размерность левой части равенства должна совпадать с размерностью правой. Как говорят физики, такая формула «не проходит по размерности».

Хорошо, так нельзя. А как можно?

... Остался единственный вариант (*внимание!*):

$$S = f(\alpha)c^2.$$

(*Опять внимание!*) Но ведь то же самое можно сказать и о треугольниках 1 и 2:

$$S_1 = f(\alpha)a^2$$

$$S_2 = f(\alpha)b^2$$

Осталось подставить три последних равенства в (\*):

$$f(\alpha)a^2 + f(\alpha)b^2 = S = f(\alpha)c^2$$

После сокращения получим выражение для известной теоремы Пифагора:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

сумма квадратов катетов равна квадрату гипотенузы.

Так физика (метод размерностей) «расправляется» с математикой. Красиво?

**Вопрос 29:** Может, так вообще всю математику можно построить? (Вот было б здорово!)

... Я могу представить, что такой вывод теоремы вызвал у вас подозрение, что здесь не всё чисто, есть какой-то скрытый фокус. Не волнуйтесь, ещё привыкнете.

А теперь вернёмся к тому, ради чего все затевалось.

### 5.3. ПРИМЕР № 3: ВЫВОД ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА

Итак, предположим, что период колебаний маятника  $T$  зависит от всех упомянутых выше параметров. То есть мы выдвигаем такое предположение, такую *гипотезу*:

$$T = f(L, m, t^\circ, g, \alpha, \dots)$$

Теперь аккуратно посмотрим на размерность всех величин слева и справа от знака равенства.

$$[T] = \text{с (секунды)}$$

$$[L] = \text{м (метры)}$$

$$[m] = \text{кг (килограммы)}$$

$$[t^\circ] = \text{град (градусы)}^*$$

$[g] = \text{м/с}^2$  — метр делить на секунду в квадрате — *почему?* — придется вам пока поверить на слово, что размерность параметра  $g$  именно такая!

$[\alpha]$  = измеряется в единицах, называемых радианы, но сами радианы определены так, что длина одной величины (дуги) делится на длину другой величины (радиуса), т. е. метры делятся на метры, и получается, что угол (в этом смысле) не имеет размерности; короче: *мы должны считать не имеющим размерности*.

А теперь переведем равенство на язык размерности:  $c = f(\text{м, кг, град, м/с}^2)$ .

Мы видим, что из метров, килограммов, градусов и секунд в правой части нам нужно составить такую их *комбинацию*, которая давала бы нам чистые секунды — ведь в левой части стоят именно они!

Как же это сделать, как избавиться от всяких метров, килограммов и градусов?!

От метров избавиться несложно. Поскольку у нас есть не *одна* величина с метрами, а целых *две* ( $L$  и  $g$ ), то можно составить их отношение (или произведение), возможно, в нужной степени, чтобы метры сократились.

Нетрудно видеть, что такая комбинация параметров, как  $L/g$  или  $g/L$  по размерности от метров уже не зависит, нет там метров:  $[L/g] = \text{с}^2$ , а  $[g/L] = 1/\text{с}^2$ . И никак иначе нам этого не сделать!

\* Позже мы увидим, что градус градусу не товарищ: разные бывают градусы — но пока это нам не важно. И не спутайте эти градусы с угловыми!

А вот от килограммов и от градусов нам так просто не избавиться: ни массу, ни температуру просто не на что делить! Положение почти безвыходное. Остаётся прибегнуть к крайним мерам — объявить, что *ни от массы, ни от температуры период колебаний не зависит*.

**Вопрос 30:** Объявить-то можно всё, что угодно, а так ли это на самом деле?

**Ответ 30:** В физике не бывает «на самом деле». Могут быть лишь факты, подтверждаемые экспериментом или неподтверждаемые. Мы выдвинули гипотезу, предположение, что период  $T$  зависит от таких-то параметров. Тогда математика говорит нам: или  $T$  от температуры не зависит, или нужно вводить ещё какой-то параметр с размерностью, связанной с градусами. Как нам поступить? Проще всего ответить: хорошо, пускай не зависит — посмотрим, что скажет на эту тему предстоящий эксперимент.

Что же получилось? А получилось, что

$$[T^2] = [L/g]^*$$

Надеюсь, вы ещё помните, что равенство размерностей ещё не означает равенства самих величин. Сами величины могут быть равны лишь с точностью до постоянного числового коэффициента (естественно, размерности не имеющего). Поэтому можно написать:

$$T^2 = k(L/g)^{**}$$

Вот такая у нас получилась теоретическая формула для связи периода колебаний с длиной маятника и величиной земного тяготения (гравитации).

Теперь не страшно и за эксперимент взяться.

\* Мы написали  $T^2$ , а не  $T$ , чтобы не связываться с корнями в правой части (степени как-то приятней...)

\*\* Не спутайте круглые скобки с квадратными!

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТ

В чём он состоит? Грубо говоря: есть подозрение (гипотеза), что квадрат периода колебаний маятника  $T^2$  меняется прямо пропорционально отношению длины нити  $L$  к «показателю земной гравитации»  $g$ . Что говорит по этому поводу опыт: подтверждает это, опровергает или молчит (и такое бывает!).

Тут у нас с вами возникает небольшая сложность: известно ли вам, что на поверхности Земли, где мы с вами собираемся ставить опыт, величина  $g$  практически не меняется? (Голоса: Откуда! Мы ведь даже что такое это  $g$  не знаем!) Ну, что ж, не знаете — так знайте! А иначе пришлось бы начать с ещё одного опыта — по проверке неизменности земной гравитации на поверхности земли.

Ну, если про  $g$  мы договорились, то остается фактически проверить пропорциональность  $T^2$  и  $L$ : во сколько раз увеличится (или уменьшится)  $L$  — во столько раз увеличится  $T^2$  (или уменьшится).

Все просто: возьмём достаточно высокую стойку, заготовим несколько нитей разной длины (60 см, 70 см, 80 см, 90 см и 100 см). Возьмём небольшую гирьку, скажем стограммовую, а можно и 50 г. Нет гирьки? Сходите на кухню (это одно из лучших мест для занятий физикой, если вы дома, конечно) и оглянитесь вокруг: нет ли чего подходящего... Лично я обнаружил там почему-то 9-вольтовую батарейку для моего переносного приёмника. Возьмём ещё кусочек скотча, чтобы подцеплять груз, и поехали: подцепили, немного аккуратнотн отвели в сторону, взглянули на часы — и отпустили... Теперь считаем 10 полных колебаний...

### Вопрос 31: Почему 10?

(Только не ошибитесь — одно колебание — это до упора туда и потом обратно. \*)

\* Советуем вам сначала прорепетировать и выбрать такой начальный угол отклонения нити с грузом, чтобы, с одной стороны, это не было слишком быстро и было удобно считать — отличать одно колебание от другого, а с другой стороны — чтобы не слишком затягивать измерения — можно утратить внимание и ошибиться, особенно если ваши часы без секундомера.

Взгляд на часы (или нажатие кнопки) — и записываем результат — в секундах! Потом мы поделим его на 10 и получившиеся секунды (скорее всего, секунды с десятными долями) возведём в квадрат. Конечно, стоит воспользоваться калькулятором. Разумеется, калькулятор выдаст вам ответ с громадной точностью — со многими цифрами после запятой. Но вам, почти наверняка, стоит отбросить все цифры после запятой и забыть про них.

### Вопрос 32: Почему?

Прделаем такую же процедуру с другими нитями. При этом постараемся каждый раз отводить груз примерно на один и тот же угол и отпускать его без толчка. Ещё одно предостережение: необходимо, чтобы качание происходило в одной плоскости, без закручивания нити. Это не так легко сделать, как кажется. Во всяком случае сначала стоит попробовать, потренироваться, а лишь потом — начинать эксперимент.

Результаты опыта займут совсем немного места: две колонки чисел (в левой — измеренная длина используемой нити, в правой — измеренный квадрат периода колебаний):

$L$ (см)	$T^2$ (с <sup>2</sup> )	← <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Вот, что могло получиться у вас!</div>
60	64	
70	75	
80	85	
90	97	
100	108	

И что теперь с этой таблицей делать? Как её понять?

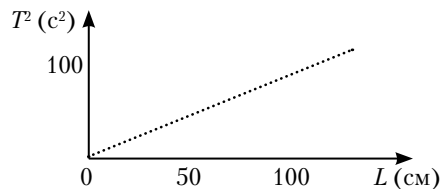
*Нарисовать!* (Обычно физики так и поступают.) **Чем больше рисунков, тем физичнее!**

Нарисуем две оси — вертикальную и горизонтальную, выберем на них разумный масштаб...

### Вопрос 33: Что значит «разумный»?

... и нанесём туда наши результаты — лучше в виде крестиков (не обязательно очень маленьких, что-то вроде курсора в компьютерной рисовалке) — чтобы их перекрестия соответствовали полученным измерениям:





Математика нам подсказывает: геометрически, т. е. на графике, прямо пропорциональная зависимость (если она действительно есть) — это прямая, проходящая через начало осей. (В самом деле, если только  $T^2 = k(L/g)$ , то при  $L = 0$   $T^2 = 0$ .)

Вопрос в том, «ложатся ли» экспериментальные точки на одну прямую? Возьмем линейку, совместим её с началом осей и постараемся найти такое её положение, чтобы все (лучше, чтобы все!) крестики оказались или просто на ней (бывает, но редко, и обычно — подозрительно)...

**Вопрос 32:** Почему?

... или вблизи неё, желательно равноудалённо: некоторые выше, некоторые ниже...

**Вопрос 34:** Бывает, что по результатам эксперимента *один* из многих крестиков явно не ложится на прямую. Что бы это могло означать, какую ситуацию? Что стоит сделать в таком случае?

Но у нас-то — вроде все в порядке... — вот она — прямо пропорциональная зависимость.

Итак, что — действительно мы можем утверждать, что для периода колебаний маятника справедливо такое соотношение:

$$T^2 = k(L/g) ?$$

$$\text{Или } T = k'\sqrt{L/g} ?$$

**Вопрос 35:** Почему в последней формуле  $k'$  вместо  $k$  ?

Да или нет?

— Не совсем «да».\*

— То есть?

— Я бы сказал так: *это верно при определённых оговорках, в определённых условиях.*

**Вопрос 36:** А что, **любое физическое утверждение верно не всегда?**

**Ответ 36:** К сожалению, это так. К сожалению — потому что это сильно усложняет ситуацию. Ну, представьте себе: при бабушке можно говорить одно, при тётушке — другое, а всей правды — никогда высказать в принципе невозможно! Нравится? Вот так и в физике. Но физикам почему-то нравится...

\* Вот она — «мерзкая» манера физиков: ничего не говорить определённо. Разве так можно о чём-нибудь договориться? Увы, у физиков при изучении законов природы есть три принципиальные возможности: говорить определённо, но точно неправду (с точки зрения природы); говорить часть правды, но предупреждать, какова она, эта часть; или просто молчать. И что вам ближе? Если первое, то возможно вы — в душе математик. Если второе — то физик. А если третье — вам лучше заняться, например, музыкой.

## 7. ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТА

Мне кажется, самое интересное в полученном нами результате — то, что период колебаний  $T$  не зависит от угла начального отклонения  $\alpha$ . Неужели период будет один и тот же, если мы отведём нить чуть-чуть и если расположим её почти горизонтально и отпустим?! Не верю!

Кто не верит — пусть проверит.

**Вопрос 37:** Проверьте: вплоть до каких углов (конкретно) работает формула  $T = k\sqrt{L/g}$ . (Предупреждаем: это уже эксперимент посложней.)

А вот что говорит по этому поводу теория, использующая пока недоступную нам математику: *полученная формула верна лишь для малых  $\alpha$ !*

Естественный вопрос: что значит *для малых*? В каком смысле малых?

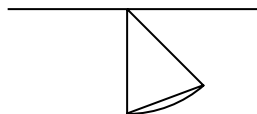
**Вопрос 38:** Какие углы  $\alpha$  вы назвали бы малыми?

**Ответ 38:** Гулливер был мал в стране великанов и сам был великаном в стране лилипутов.

Вывод: *степень малости любого параметра определяется в зависимости от условий конкретной задачи.*

Теперь про  $\alpha$ . Очевидно, его величина определяется отношением длины дуги, которая его замыкает, к длине нити маятника (мы уже упоминали про это в разговоре про размерность  $\alpha$ ), т. е.:

длина дуги  $\ll L$   
или (длина дуги)/ $L \ll 1$



Но для малых дуг (малых углов) их длина почти не отличается от длины замыкающего её отрезка (хорды).

Поэтому условием малости угла отклонения будет  $x/L \ll 1$

Короче говоря, полученная формула хорошо работает при начальных отклонениях  $x$ , малых по сравнению с длиной нити.

**Вопрос 39:** Пусть длина нити — 100 см. При каких отклонениях можно спокойно пользоваться нашей формулой?

**Ответ 39:** Ну, положим, у нас ещё не совсем формула. Скорее, это *зависимость* — про коэффициент ведь мы до сих пор ничего не знаем. Но хорошо... Я думаю (из личного опыта), что даже отклонение на  $x = 30$  см от вертикали будет позволительно. Впрочем, стоит дождаться результатов эксперимента, о котором мы говорили в **Вопрос 38**.

Итак, первое *ограничение* для пользования  $T = k\sqrt{L/g}$  — малость начального отклонения.

Что ещё? Просто перечислим всё, что может *отменить* наш результат: — сопротивление среды движению груза (даже в воздухе, не говоря уже о воде или масле);

**Вопрос 40:** Как можно было бы «отбросить» упрёк про неучёт сопротивления среды?

**Ответ 40:** Например, так: если размеры груза очень малы (физики говорят: если считать груз *материальной точкой*), то и о сопротивлении будет говорить неуместно.

— неплоское качание (нетрудно почувствовать, что оно может очень быстро всё испортить);

— малость массы нити;

**Вопрос 41:** По сравнению с чем?

**Ответ 41:** А кроме груза и нити больше ничего и нет в нашем распоряжении. Поэтому масса нити должна быть мала по сравнению с массой груза:  $m_{\text{н}} \ll m$

Ещё?

— постоянство длины нити за время колебаний. (На самом деле любая нить может деформироваться, и обязательно это делает под действием собственного веса и груза. Но эта деформация может быть мала — и тогда ею можно пренебречь. Такую нить физики называют *нерастяжимой*.)

*Материальная точка и нерастяжимая нить* — это примеры того, чего в природе не бывает, это *модели* отдельных её свойств.

Но так же, как свойства самолётов удобнее (и дешевле!) изучать на их моделях, так и со многими другими движениями.

*Физики имеют дело (в своих оценках, выводах, предсказаниях) не с фотографиями природы, а с шаржами на нее. Дело физика выбрать (нарисовать) такой шарж, который подчёркивал бы самое главное, определяющее в изображаемом, и не замечал бы малосущественные мелочи.*

Всё, о чём мы сейчас рассуждали (применительно к маятнику), можно сократить буквально до одной фразы:

для *малых* колебаний *математического маятника* справедлива такая зависимость —  $T = k\sqrt{L/g}$ .

Только, чтобы было понятно, нужно уточнить: **математическим маятником** называют материальную точку, подвешенную на невесомой и нерастяжимой нити. Математический маятник — это **модель**, принятая нами при получении формулы для периода.

(Обратите внимание: мы заменили реальный объект не его фотографией, а можно сказать, шаржем на него — здесь некоторые свойства выделены, усилены, а другими — пренебрегают.)

Напоследок порадуем вас одним «бесплатным» результатом (в том смысле, что мы его не выводили, а просто взяли готовым):

на самом деле коэффициент  $k$  после соответствующих вычислений оказался равным  $2\pi \approx 6,28$ . Теперь мы можем окончательно записать формулу для малых колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{L/g}. *$$

**Вопрос 42:** Что же **САМОЕ ГЛАВНОЕ**, что стоит запомнить из нашего последнего разговора?

**Ответ 42:** Может быть, формулу для колебаний математического маятника?

Нет! Это было бы неплохо, удобно, но это не главное! Стоит запомнить вот что:

любое физическое утверждение (формула, закон) верно не всегда, а лишь при определённых условиях

По сути дела эти условия являются частью физической модели.

\* Мы вынуждены пока умолчать об очень важной штуке, которую мы до сих пор игнорировали в нашем разговоре, — любое измерение делается с определённой точностью, так как любые приборы больше или меньше врут (они же не люди!). Но — всему своё время.

## 8. ОЦЕНКА

Вот **вполне реальная задача**: Чему равно давление в центре Земли?

Первое, о чем полезно подумать (при любом вопросе) — а это правда? Или: откуда оно (давление) там взялось?

**Вопрос 43:** Откуда?

Обратите внимание: эксперимент в этом случае нам не помощник — как доставить датчик давления на место опыта (в центр подземного мира)?! Вот *именно в таких случаях* (трудно поставить эксперимент) и *хорош метод размерностей*.

Вообще-то давление  $p$  на какую-то площадку  $S$  — это по определению (по договорённости физиков между собой) *сила*  $F$ , давящая на эту площадку, делённая на величину площадки:

$$p = F/S$$

На первый взгляд с Землёй ничего не понятно: что считать силой? что считать площадкой, на которую давят?

Это действительно непросто и требует определённого опыта и привычки.

Тем не менее, рассмотрим некоторую аналогию, **вспомогательный пример**:

*чему равно давление слона на землю?*

Здесь всё гораздо яснее: нужно вес слона (а это, как мы потом увидим, произведение его массы на ту самую постоянную  $g$ , которую мы встретили в формуле для маятника) поделить на суммарную площадь его ступней:

$$p_{\text{слона}} = M_{\text{слона}}g/4S_{\text{ступни}}$$

**Вопрос 44:** Откуда четвёрка в знаменателе?

А откуда мы возьмём массу слона и, тем более, площади его ног? Отвечаем: массу лично я взял бы из энциклопедии или залез бы в Интернет на [animals.ru](http://animals.ru) — наверняка там что-то есть. Но это, скорее всего, данные *от и до*, но ведь можно взять какое-то среднее значение... Что касается ступни, то надо призвать на помощь свой личный опыт — вы ведь бывали в зоопарке? Вот и *прикиньте* раз-

меры *его* ступни — примерный радиус. А площадь круга мы уже считали. Результат вычислений будет, конечно, примерным. Но это так и называется: не *измерение*, а *оценка*.

Теперь вернёмся к давлению в центре Земли. Понятно, что в разговоре о Земле и её действии на что-то единственной силой, которая *характерна* для Земли, является *вес* всей Земли. А единственной характеристикой Земли, имеющей размерность площади, будет квадрат земного радиуса:

$$p_{\text{центр}} = M_3 g / R_3^2$$

(Не будем производить сейчас вычисления, просто заметим, что  $M_3 \approx 6 \times 10^{24}$  кг, а  $R_3 \approx 6400$  км.)

Кстати, если честно посчитать по выбранной нами (из самых общих соображений!) формуле, то мы ошибёмся (против эксперимента\*) всего в 4 раза.

Вы скажите: ничего себе — ВСЕГО в 4 раза! Да попробуй я на контрольной по математике... Вряд ли меня похвалят! Всё верно, но — то на контрольной, во-первых, и на математике, во-вторых. А в нашем случае — были такие варианты: а) ничего не знать; б) знать хоть с какой-то точностью. А ведь мы узнали не просто с *какой-то* точностью, а с *точностью до порядка*, т. е. ошиблись меньше, чем на порядок, меньше, чем в 10 раз! Чаще всего метод размерностей и дает нам оценку величины с точностью до порядка.

Замечательный физик *Энрико Ферми* говорил так:

«...действительно понимающие природу того или иного явления должны получать основные законы именно из соображений размерности».

Чтобы овладеть этим замечательным методом, стоит потренироваться:

**Вопрос 45:** Сравните давление слона на землю с атмосферным давлением. Что больше?

**Вопрос 46:** Оцените давление шариковой ручки на бумагу при письме.

**Вопрос 47:** Можно ли надавить пальцем так, чтобы создать давление 1000 атмосфер?

\* Интересно, как всё-таки его поставили?...

## 9. МЕТОД

Подведём некоторые итоги. Какие моменты можно выделить в решении задачи о поиске способа не опаздывать на встречу с ВЧ? Причём, нас, конечно, интересуют моменты, типичные для любой физической задачи. Вот они —>

Вот такая схема... А вы как думали — всё так просто?!

Пройдёмся по всем этапам нашего решения конкретной задачи:

*задача:* измерить время → *идея:* качание маятника → *модель:* математический маятник → *теория 1:* гипотеза  $T = k\sqrt{L/g}$  → *эксперимент:* проверка пропорциональности  $T^2$  и  $L/g$  → *теория 2:* \*  $T = 2\pi\sqrt{L/g}$  → *следствия* (предсказания теории): ... → *эксперимент 2:* проверка предсказаний — ...

Несколько слов о возможных в нашем случае предсказаниях. Если бы мы побольше знали о постоянной тяготения  $g$ , то сказали бы: так как с увеличением расстояния от Земли её тяготение слабеет, т. е.  $g$  *уменьшается*, то период колебаний маятника должен *увеличиваться* с поднятием его повыше над землёй. Иначе говоря, на вершине горы маятниковые часы должны немного отставать от таких же часов у подножия горы. Можете проверить! Нужно только заранее оценить ...

**Вопрос 48:** Что?

*Метод работы Физика* можно обозначить ещё более крупными мазками:

НАБЛЮДЕНИЕ + РАЗМЫШЛЕНИЕ + ОПЫТ

\* У нас не было этого этапа!



## 10. ФИЗИКИ: ТЕОРЕТИКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАТОРЫ

Можно сказать, что физики — это люди, профессионально занимающиеся физикой.

**Вопрос 49:** Что значит «профессионально»?

Тут, конечно, может быть много разных мнений,\* но особо долго разговаривать на эту тему вряд ли имеет смысл... Есть такой способ давать определение через перечисление, т. е. через примеры. Тогда физики — это такие люди, как Галилей, Ньютон, Фарадей, Максвелл, Эйнштейн, Бор...

**Вопрос 50:** Люди какой профессии могли бы выстроиться в столь же блестящий ряд представителей нашей цивилизации? Кто — писатели, музыканты? Кто ещё?

Заметим, что возможна (и естественна!) некоторая путаница, смешение физиков и техников, физиков и инженеров. Недаром многие университеты выдают диплом о получении квалификации физика — тире — инженера. А ведущий русский физический центр так и называется: Физико-технический институт. И всё-таки: Роберт Вуд был физиком, а Томас Эдисон — инженером. На всякий случай напомним высказывание Фейнмана: «Не всё, что *нефизика*, то плохо. Любовь, например, тоже *нефизика*...».

*О теоретиках и экспериментаторах.* Поначалу, конечно, такого деления не было. Галилей бросал тела с Пизанской башни и формулировал принцип инерции. Ньютон ставил опыты с разложением белого света на цветные лучи и строил теорию всемирного тяготения. Гук, Гюйгенс, Паскаль — все они были «просто физиками».

Но уже в 19-ом веке некоторые люди стали проводить *всё свободное время* в лаборатории, придумывать и делать приборы, придумывать и ставить эксперименты, наблюдать и делать выводы. Понятно, что это были люди, склонные к работе руками, ин-

тересовавшиеся «железками», умевшие не просто разглядывать, а именно наблюдать. Наблюдать и удивляться! Впрочем, умение не пройти мимо того, что, возможно, видели тысячи людей, видели — но не увидели ничего интересного — главное, что отличает настоящего исследователя от «артиста», играющего роль учёного.

Чистыми экспериментаторами были Майкл Фарадей, «сделавший» современное электричество, Роберт Вуд\* — отец физической оптики — науки о свете, Петр Капица — тоже один из отцов — физики низких температур. Наши современники швейцарцы Мюллер и Беднортц, открывшие высокотемпературную сверхпроводимость, россиянин Жорес Алфёров, получивший Нобелевскую премию за создание гетеролазеров (не пугайтесь всех этих слов — в своё время мы разберёмся и с ними), так вот — все они — тоже физики-экспериментаторы.

Одновременно с экспериментаторами появились и первые *теоретики*. Я думаю, сначала это были просто постаревшие (и обленившиеся) «просто физики»: сиди себе, думай да вычисляй.\*\* Потом к ним присоединились физики, у которых «руки не туда приставлены». По этому поводу есть много исторических анекдотов. Про Вольфганга Паули, например, утверждали, что достаточно ему войти в лабораторию, чтобы в ней что-то перестало работать («эффект Паули»). Документально известно, что однажды в лаборатории в Геттингене случился взрыв, разрушивший дорожную установку. Время этого ЧП было точно замечено.

\* Есть книга о Вуде, написанная В. Сибруком, с таким подзаголовком: «История американского мальчика, который стал самым дерзким и оригинальным экспериментатором наших дней, но так и не вырос». Там много замечательных историй. Самая известная — про кошку (вы прочтёте её сами). А первой публичной научной победой Вуда было применение принципа сифона, о котором он узнал из старой отцовской книжки. ...В январе в Бостоне случилась оттепель, и под горкой, с которой катались мальчишки, образовался маленький пруд. Это было плохо, потому что всех обдавало грязной водой. Роб появился со шлангом для полива сада и объявил, что откачает всю воду. Более старшие ребята стали смеяться: вокруг лужи было возвышение больше, чем на фут, и все хорошо знали, что вода в гору не течёт. Вуд положил шланг на землю, велел одному из мальчиков заткнуть один конец пальцем, а сам стал набирать воду, пока весь шланг не наполнился. После этого достаточно было просто положить конец шланга на землю за возвышение. Но это был Вуд — не только экспериментатор, но и демонстратор по своей природе: он перекинул шланг через высокий забор, отделявший дорогу от канавы...

\*\* На самом деле уже Коперника (16-ый век!) можно отнести к теоретикам — сам он наблюдал мало, пользовался в основном результатами, полученными Тихо Браге (экспериментатором?).

\* См. любопытную книжку А. Мигдала «Поиски истины», М., 1983. Аналогичная книга, посвященная труду математика (автор В. Смилга), была названа «В погоне за красотой».

Оказалось, что взрыв произошел в тот момент, когда Паули ехал из Цюриха в Копенгаген и его поезд на две минуты остановился в Геттингене.

Чистыми теоретиками были такие гении, как Максвелл и Эйнштейн, Бор и Фейнман, Ландау и Сахаров. Для такой работы, понятно, мало иметь «неумелые руки», и даже совсем не обязательно. Но — свободно владеть разнообразной математикой, обладать хорошим воображением, *любить* вычисления, умение связать формулу с реально происходящими явлениями — всё это совершенно необходимо физико-теоретику.

О физиках-теоретиках и их работе тоже написано немало замечательных книг.\* У теоретиков постоянные и непростые взаимоотношения с экспериментаторами. Вот история, которая случилась в моём институте. Однажды один экспериментатор изловил в коридоре нашего выдающегося теоретика Якова Френкеля и показал ему полученную кривую. Подумав минуту, Френкель сказал: «Ну, это понятно...» и дал объяснение виду кривой. Френкель пошел дальше (коридоры у нас в институте длинные), но через минуту его догнал тот же самый экспериментатор и сказал, что случайно показал ему свою кривую вверх ногами. Подумав минуту, Френкель сказал: «Ну, это тем более понятно...» и снова всё объяснил.

Впрочем, бывали и исключения. Великий Энрико Ферми создал теорию так называемого  $\beta$ -распада — одну из красивейших физических теорий, а буквально на следующий год экспериментально открыл явление искусственной радиоактивности ядер, за что и получил Нобелевскую премию. Но всё-таки — это исключение.

У экспериментаторов — свои радости. Над входом в лабораторию низких температур в Лейдене (Голландия) висит девиз: «Знание через измерение» (*Door Meten tot Weten*). А вот как вспоминал потом Эрнест Резерфорд момент открытия им ядра в атоме: «...Это было самым невероятным событием в моей жизни. Оно было столь же невероятным, как если бы 15-дюймовый снаряд, выпущенный в лист папиросной бумаги, отскочил бы от неё и ударил бы в стреляющего».

Радость теоретика чуть-чуть понятна каждому: каждый из нас хоть раз в жизни решил трудную (такую, что можно похвастаться) задачку — логическую, математическую или бытовую. Но, возможно, главная радость теоретика — это когда его рассуждения или расчёты позволяют объявить: в мире, господа теоретики и инженеры, есть ещё нечто (точнее, должно быть), мимо чего вы все до сих пор проходили не замечая! Так появились на свет радиоволны, античастицы, нейтрино и много чего замечательного другого...

**Вопрос 51:** Дюйм — это сколько сантиметров?

\* Например: Джордж (Георгий) Гамов. Моя мировая линия. Или: Are you joking, Mr. Feynman?

# 11. ЧТО ИЗУЧАЮТ ФИЗИКИ: ПРОСТРАНСТВО. ВРЕМЯ. МАТЕРИЯ

## 11.1. ПРОСТРАНСТВО

У каждого из нас есть свои размеры — рост, толщина...

**Вопрос 52:** Как (каким способом) вы определили бы свою толщину?

Каждый из нас занимает какое-то своё место — в кресле, в комнате, в доме, в городе... Если кто-то забывает об этом, то натывается на другого: пытается сесть на уже занятый стул, войти в набитый людьми автобус, припарковать свою машину, расталкивая уже стоящие там... Можно сказать, что природа, пригласив все тела в этот мир на спектакль под названием Жизнь, выдала всем свой билет; но не просто с правом входа, а с гарантией своего места в этом мире.

Итак, наш опыт говорит, что все тела имеют какую-то протяжённость, они занимают определённое место и как-то располагаются друг относительно друга. То, в чём они располагаются, мы называем *пространством*.

Иногда *всё пространство*, в котором мы существуем и которое мы (или другие люди) можем наблюдать (не обязательно глазами, можно и с помощью каких-нибудь радиотелескопов), мы называем *мир* или *Вселенная*.

То, что окружающий нас мир фантастически разнообразен, не удивительно — ведь он так велик. Удивителен масштаб наших знаний о мире — откуда и докуда. Наибольшее расстояние, на которое проник человек (с помощью современных приборов), — это величина порядка  $10^{26}$  м. Наименьшее — это размер деталей элементарных частиц (они исследуются на крупнейших ускорителях) — порядка  $10^{-18}$  м.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ:** про запись чисел в виде степени десяти.

Вот пример: расстояние от Земли до Луны примерно 360 000 км. Перепишем эту величину так, как удобно

для возможных вычислений и сравнений с другими величинами:

$$\begin{aligned} 360\,000 \text{ км} &= (360 \times 1000) \text{ км} = 360 \times 10^3 \text{ км} = \\ &= (3,6 \times 100) \times 10^3 \text{ км} = 3,6 \times 10^2 \times 10^3 \text{ км} = \\ &= 3,6 \times 10^{2+3} \text{ км} = 3,6 \times 10^5 \text{ км} = 3,6 \times 10^5 \times 10^3 \text{ м} = \\ &= 3,6 \times 10^{5+3} \text{ м} = 3,6 \times 10^8 \text{ м} \end{aligned}$$

— заодно мы перевели километры в более удобные для физических вычислений метры.

Напомним **ПРАВИЛА РАБОТЫ СО СТЕПЕНЯМИ:**

$$10^{\beta} \times 10^{\gamma} = 10^{\beta+\gamma} (10^5 \times 10^3 = 10^{5+3})$$

$$10^{-\gamma} = 1/10^{\gamma} (10^{-3} = 1/10^3)$$

$$10^{\beta}/10^{\gamma} = 10^{\beta-\gamma} (10^3/10^5 = 10^{3-5} = 10^{-2})$$

Вот общий математический рецепт: записать какое-то число  $A$  «в виде степени 10» означает записать его в виде  $A = \alpha \times 10^{\beta}$ , где  $\alpha$  — обязательно меньше 10.

Например:  $360\,000 = 3,6 \times 10^5$ .

Напомним, что когда мы говорим о *порядке величины*, то обычно подразумеваем вот что.

По порядку величины расстояние от Луны до Земли — это  $10^8$  м. То есть, говоря так, мы просто не учитываем коэффициент  $\alpha$  перед десяткой в какой-то степени, или точнее — считаем (приблизённо, для оценки)  $\alpha = 1$ .

**Вопрос 53:** Каков порядок радиуса Земли в метрах? Массы Земли в килограммах?

**Вопрос 54:** Во сколько раз наибольшее из измеренных (или вычисленных) человеком расстояний больше наименьшего?

(Сравните полученный результат с числом атомов, составляющих человека. Человек состоит примерно из  $10^{16}$  клеток, а каждая человеческая клетка — из  $10^{13}$  атомов.)

Вернёмся к пространству. Между размером видимой части Вселенной и размером деталей элементарных частиц расположились все другие размеры и расстояния нашего мира: размер нашей Галактики, Земля, горы на Земле, мы сами, песчинка, вирус, ядро атома.....

Для измерений и вычислений всего этого диапазона величин, естественно, вводились самые разные единицы длины. Самая маленькая единица — 1 ферми (1F) — была названа в честь Энрико

Ферми.  $1\text{F} = 10^{-13}\text{ см} = 10^{-15}\text{ м}$ . Довольно часто физики пользуются такой единицей длины, как 1 Ангстрем (в честь шведского ученого):  $1\text{Å} = 10^{-8}\text{ см} = 10^{-10}\text{ м}$ .

А самая большая единица — расстояние, которое проходит свет за 3,2 года — 1 парсек = 1 пс.

**Вопрос 57:** Почему был введён 1 Å?

**Вопрос 58:** Оцените в метрах расстояние в 1 пс. Сравните его с расстоянием от Земли до Полярной звезды.

**Вопрос 59:** Оцените по порядку величины размер видимой части Вселенной в световых годах, т.е. в расстояниях, которые свет проходит за 1 год своего движения.

Опыт показывает, что законы движения очень малых тел — молекул, атомов, электронов — принципиально отличаются от тех правил, которым подчиняются обычные тела, окружающие нас — песчинки, шарики, стулья, автомобили... Если вдуматься, то это не так удивительно. Маленький человек двигается лишь несколько иначе, чем большой. Но ведь их размеры отличаются всего лишь в разы:  $200\text{ см} / 50\text{ см} = 4$ , т.е. они *одного порядка!* Обычная вода замечательно течёт по трубе водопровода диаметром 2 см (если её не отключили), а сквозь узкую трубочку диаметром 1 мм = 0,1 см, т.е. в 20 раз меньше, её надо специально проталкивать. А ведь размеры атомов отличаются от размеров человека на 10 порядков! Т.е. в 10 000 000 000 раз — в 10 триллионов раз!

Надо сказать, что и у очень больших тел — звёзд, галактик — свои особен-

## РАССТОЯНИЯ

*метры*

$10^{26}$  размер видимой части Вселенной

$10^{24}$  до ближайшей к нам Галактики

$10^{21}$  размер нашей Галактики

$10^{18}$  до ближайшей к нам звезды

**B55:** До какой?

$10^{13}$  от Земли до Солнца

$10^8$  от Земли до Луны

$10^6$  размер Земли

$10^3$  горы на Земле

$10^0$  человек

$10^{-3}$  песчинка

$10^{-4}$  толщина листа бумаги

**B56:** Как её измерить?

$10^{-7}$  вирус

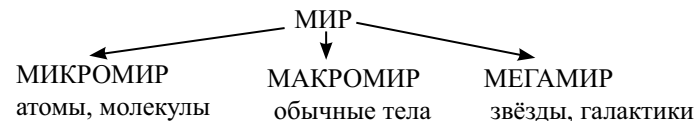
$10^{-10}$  атом водорода

$10^{-15}$  ядро атома

$10^{-18}$  детали элементарных частиц

ности поведения. Правда, законы мегамира, по крайней мере, написаны на том же языке, что и законы макромира. Разве что на разных диалектах. Хотя, правильнее будет сказать, что мы просто не знаем единого языка, но в природе он, скорее всего, существует.

Итак, в нашем мире можно (*условно!*) выделить три области:



Подчеркнём, что это деление — достаточно условное: *нельзя* сказать, что ДО такого размера — это микро-, а ПОСЛЕ — макро.

**Вопрос 60:** Опять придётся в каждом случае, в каждой задаче решать этот вопрос заново?

**Ответ 60:** Не совсем. Обычно разница между макро- и микро-размерами громадна, очевидна и не требует уточнений. Но иногда (достаточно редко) требуется специальная прикидка: какое описание в данном случае правомерно, т.е. отвечает опытным фактам.

Между прочим:

**Вопрос 61:** Знаете ли вы, что многие единицы длины выбирались самым естественным образом, например, 1 фут (foot) — это длина некоторой средней ступни. Интересно: какому размеру обуви соответствует 1 фут?

**Вопрос 62:** Знаете ли вы: что такое 1 локоть? 1 косая сажень?

**Вопрос 63:** Знаете ли вы: в честь чего выбрано название такой единицы, как 1 дюйм (inch)?

**Ответ 63:** Это ширина большого пальца у его основания. (Сравните со своим.)

**Вопрос 64:** С помощью увеличительного стекла (лупы) рассмотрите сахар, кофе, поверхность ножа...

**Вопрос 65:** Есть ли у вас какие-то идеи насчет того, как лупа может увеличивать изображение предметов?



## 11.2. ВРЕМЯ

Да, это действительно интересный вопрос: что такое время...

Ребёнок, которому всего несколько месяцев, понимает, что такое *здесь* и *там* — у него уже есть ощущение *пространства*. Лишь после года он начинает понимать *сейчас*, потом — *скоро*, в три года появляется *сегодня*, *вчера* и *завтра*. И только где-то к семи годам складывается представление о времени как о всегда, везде и *равномерно* текущем *потоке* мгновений.

**Вопрос 66:** Каким *преимуществом* обладает пространство перед временем с точки зрения человека?

**Ответ 66:** Первое: пространство можно видеть и даже слышать. Второе: в пространстве можно перемещаться. То же самое во времени — любимый сюжет фантастической литературы. Третье: пространство «стоит», а время — неудержимо бежит. Четвертое: время имеет направление — от прошлого к будущему. Итого: **время сложнее пространства**.

Древний умница Гераклит две с половиной тысячи лет назад сказал про время так, что мы до сих пор повторяем его: «*Всё течёт, всё изменяется*».

Мир — это не только пространство. В его театре всё время происходят события (рождение человека, солнечное затмение, смена президента, покупка велосипеда, окончание школы...). События начинаются, длятся, заканчиваются. Мир, кроме пространства, — это ещё и поток событий. Если вдуматься — то, что любые два события могут происходить одно *после* другого, одно *раньше*, а другое *позже* — вот *это мы и называем временем*.

**Вопрос 67:** Можно ли, не имея такого понятия, как *время*, объяснить кому-то, что значат слова *причина* и *следствие*?

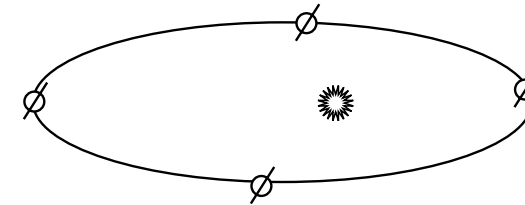
**Вопрос 68:** Как возникают день и ночь?

**Вопрос 69:** Что такое год?

**Вопрос 70:** Что такое месяц?

**Вопрос 71:** Как получаются времена года?

**Ответ 71:** Времена года — результат наклона земной оси относительно плоскости земной орбиты.



Летом северное полушарие наклонено к Солнцу, зимой — наоборот. Весной и осенью — промежуточные ситуации.

Любопытно, что, в отличие от единиц пространства (вёрсты, мили, лье, ли ...), единицы времени — одни и те же в любой стране: это секунды.

**Вопрос 72:** Как вы думаете, почему?

Что такое одна секунда? В моём детстве не было не только цифровых фотоаппаратов, но даже и фотолабораторий Кодак. Надо было самому печатать фотографии. Для этого следовало научиться открывать затвор увеличителя (поворачивать тёмное стёклышко) на определённое время, часто на одну-две секунды. Меня учили так: скажи нормально, как ты говоришь обычно — двадцать один — это будет секунда, а двадцать один — двадцать два — это две секунды.

Но, как вы понимаете, требовались и более точные стандарты. Сегодня самые лучшие часы позволяют измерять время с точностью до...

**Вопрос 73:** Не смотрите дальше! Проверьте свою интуицию: с какой точностью работают лучшие современные часы?

**Ответ 73:** С точностью до миллиардных долей секунды в сутки!

**Вопрос 74:** С какой точностью такие часы могут измерить промежуток времени в миллион лет?

**Вопрос 75:** Зачем может быть нужна такая жуткая точность?

Это так называемые атомные часы: они используют строго периодические колебания излучения, испускаемого атомами. После создания атомных часов, вместо определённой части суток или года, единицей времени стала «атомная секунда»: за 1

секунду *принят* промежуток времени, в течение которого в строго определённом излучении атома цезия произойдет 9 192 631 770 колебаний.

А теперь посмотрим на шкалу времён, где приведены (в секундах!) времена самых разных событий — от немыслимо длинных, для нас практически вечных, — до таких стремительных, что непонятно, как можно успеть узнать, сколько они длились.

*Заранее поясним, что*

- протон — это микрочастица, входящая (иногда не одна) в состав ядра атома;
- электрический ток в сети, к которой подключены наши дома, ведёт себя, как маятник, — он всё время меняет своё направление и величину, поэтому можно ввести понятие периода тока;
- звук в воздухе — это сжатия и разрежения воздуха, которые, появившись в одном месте, распространяются от него в другие места;
- воздух, как и другие вещества, состоит из молекул, которые ведут себя подобно толпе на базаре, — всё время движутся, сами не зная куда, и меняют направление своего движения из-за столкновений с другими молекулами.

## ШКАЛА ВРЕМЕН

$t$ (секунды)
$10^{39}$ время жизни протона
$10^{18}$ возраст Вселенной
$10^{17}$ возраст Земли
$10^{10}$ живёт кедр
$10^5$ одни сутки
$10^0 = 1$ одна секунда
$10^{-2}$ период изменений тока в сети
$10^{-3}$ период колебаний звука
$10^{-9}$ время между двумя столкновениями молекул в воздухе
$10^{-24}$ время, за которое свет проходит поперёк ядра атома

счёта времени были положены числа 12 и 60, священные для жителей древнего Вавилона.

Кстати, обратили ли вы внимание, что в недавнем разговоре про разные экзотические единицы длины мы как бы забыли про *метр*. А ведь он — как бы Адам, прародитель остальных единиц длины. По крайней мере, так договорилось считать международное сообщество физиков. Но мы стараемся ничего не забывать (другое дело, что это у нас не всегда получается). Просто в своё время мы не могли этого сделать, а теперь — время пришло.

### Вопрос 78: Догадываетесь, почему?

Что же такое один метр?

В 1791 году Национальное собрание Франции приняло специальное постановление: считать расстоянием в 1 метр одну сорок миллионную часть длины парижского меридиана.

### Вопрос 79: Что такое меридиан? Парижский меридиан?

Специальная геодезическая партия на самом деле прошла от Ла Манша до Барселоны (четверть длины меридиана — от моря и до моря) и определила длину той «ленты», которая нужна, чтобы уложить её на земле вдоль этого расстояния. И взяли указанную малую долю этой «ленты». Позже, на основании этих измерений был изготовлен специальный эталон — что-то вроде куска рельса из сплава платины с иридием. Он хранился в специальном помещении, в Севре, под Парижем. С этого эталона были сделаны другие, естественно, уже менее точные копии, а с них — остальные метры — портновские, плотницкие, землемерные, ученические и т. д.

Долгое время такое определение метра было достаточно для практических и научных нужд. Но постепенно претензии к севрскому эталону накапливались: его длина слабо, но всё-таки зависела от температуры, его состав постепенно менялся (металл тоже испаряется и обменивается атомами с тем, на чём он лежит), наконец, такой эталон может быть утрачен вообще — из-за землетрясения или, например, действий террористов... И что тогда? Всё переделывать заново?

Поэтому в 1983 году было принято новое соглашение: *метр есть длина пути, проходимая светом в вакууме в течение временного интервала  $1/299\,792\,458$  секунды.*

**Вопрос 76:** Оцените по порядку величины (в секундах) продолжительности человеческой жизни.

**Вопрос 77:** Почему в сутках 24 часа?

**Ответ 77:** Деление на годы, месяцы и дни возникло из астрономических наблюдений, но дальнейшее деление на часы, минуты и секунды было совершенно произвольным и даже, как оказалось, не очень удобным. Сравните систему рублей и копеек с делением суток на 12 часов, часов — на 60 минут, минуты — на 60 секунд. Всё понятно? В основу такого под-

Какие можно сделать выводы из этого определения? В-первых, очевидно, свет в вакууме (в пустоте) движется всё время с одной и той же скоростью. И это постоянство очень надёжно установлено. Второе: скорость движения (распространения) света умеют измерять с очень большой точностью. И третье: в вакууме свет движется всегда со скоростью 299 792 км и 458 метров в секунду.

Обратите внимание, что мы незаметно от времени и расстояния перешли к разговору о скорости. Правила хорошего тона для физиков говорят: хорошо бы уточнить, что это такое, какой смысл мы (как физики) вкладываем в это понятие. Интуитивно вроде понятно — это показатель быстроты чего-то (движения тела, процесса...). Но всё-таки...

**Вопрос 80:** Чем плохо определение: «скорость чего-то — это характеристика быстроты этого чего-то»?

Но сначала о том,

### **КАК МОЖНО В ФИЗИКЕ ВВЕСТИ (т. е. определить) КАКУЮ-ТО ВЕЛИЧИНУ.**

Строго говоря, есть два способа:

а) Через другие величины (*математический метод*). Необходимый пример — определение скорости. Скорость тела — это расстояние, пройденное телом, делённое на время движения:  $V = s/t$ . По сути дела это математический способ определения. Берутся величины, которые уже определены, и как-то математически комбинируются: делятся друг на друга, умножаются...

**Вопрос 81:** А могут они складываться?

При этом новые *единицы измерения* для новой, введённой величины можно и не вводить. Можно, конечно, вместо 1 м/с ввести специальную единицу 1 *скор* = 1 м/с, но обычно этого не делают.

**Вопрос 82:** Почему?

**Вопрос 83:** Какую величину логично назвать *ускорением*?

Хорошо, будем вводить величины через другие, уже введённые. Но как быть с самыми *первыми* величинами?! А это мы уже знаем на примере «длины» (расстояния) и времени.

б) Поэтому существует второй (*операциональный*) метод.

*Основные* физические величины (они так и называются — *основные*) определяются так: даётся определённый способ (рецепт) измерения этой величины с помощью выбранного эталона. Т.е. такое определение — это рецепт, объясняющий, как в результате измерения можно сравнить какое-то свойство нашего тела с таким же свойством эталонного, «единичного» тела.

Ну, например: путь, пройденный телом, это величина, измеряемая числом «метров», укладываемых вдоль него. Более точно: следует взять линейку (или рулетку), совместить её нулевую риску с начальной точкой движения и одновременно посмотреть на число, стоящее против риски, совпавшей с конечной точкой. Это число и называется «путь, пройденный телом» (в метрах).

**Вопрос 84:** (Это непростой вопрос.) *Если вдуматься*: а разве определение величины через другие величины не содержит в себе (неявно, скрыто) рецепт измерения?

Подведем *итоги разговора про определение физических величин*. Есть два подхода. Основные физические величины (расстояние, время, массу — о ней разговор впереди) определяют через *рецепт (операции) измерения плюс задаваемый эталон*. Единица измерения такой величины всегда задаётся выбором эталона. Другой способ используется для задания производных величин — это *рецепт измерения плюс математическая формула* связи новой величины с уже введёнными.

**Вопрос 85:** Как вам нравится такое определение: «потенциальная энергия тела — это величина, характеризующая способность тела совершать работу»?

**Вопрос 86:** Пофантазируйте и попробуйте ввести вымышленные физические величины, описывающие человека. Введите какие-то основные величины. (Что можно принять основным для человека? Умность? Красивость? Сострадание?...?) Введите такую производную (от основных) величину, как «удачливость», а также единицу её измерения. Как её можно было бы назвать?

А теперь, наконец, немного **ПРО ОБЕЩАННУЮ СКОРОСТЬ**.

По сути дела, мы уже знаем, что скорость (лучше говорить тела) — это то, что называется *производная* величина, она определяется через путь и время:  $v = s/t$  — если коротко.

Диапазон различных скоростей в природе тоже велик и разнообразен.

Самое необычное в скоростях — это то, что *скорость любого материального тела имеет предел, установленный природой*. Этот предел — скорость света в вакууме, примерно 300 000 км/с. Так нам говорит опыт. И все теоретические следствия, которые следуют из этого факта (все теоретические предсказания), оправдались на практике.

**Вопрос 87:** (*Очень хитрый вопрос.*) Представьте себе ужасно сильный прожектор. Пусть его луч «бьёт» на расстояние 300 000 км. Теперь повернём прожектор на 90 градусов в течение 1 секунды (если ось прожектора смазана хорошо, то это не потребует каких-то усилий). Но тогда за то же время конец длинного светового луча переместится на четверть длины окружности ( $2\pi R/4 = \pi R/2 \approx 1,5R$  с радиусом 300 000 км, т.е. на 450 000 км за 1 с! — в полтора раза быстрее скорости света!! Как же так?!

Скорость света  $C$  (так её обычно обозначают) — вообще самая важная скорость в природе. Эксперименты говорят, что тела, движущиеся со скоростью много меньшей  $C$  (спутник вокруг Земли — скажем, 8 км/с), и тела, скорость которых сравнима с  $C$  (протон в ускорителе элементарных частиц  $V \approx 0,99C$ ) — движутся по разным законам. Спутник — по классическим законам Ньютона, а протон — по законам Ньютона, серьёзно исправленным Эйнштейном.

### 11.3. МАТЕРИЯ

Так называют всё, что нас окружает (и нас самих тоже).

**Вопрос 88:** И пространство? И время?

**Ответ 88:** Тут вопрос до сих пор открыт. Скажем, Ньютон (17-ый век) полагал, что пространство и время — что-то внешнее, нематериальное, просто в них — в пространстве и во времени происходит всё то, что мы называем жизнью в широком смысле слова — жизнь человека, камня, Солнца... Существуют и другие точки зрения...

### СКОРОСТИ

$V$ (м/с)
$10^8$ свет в вакууме
$10^7$ Земля вокруг Солнца
$10^3$ самолет
$10^2$ звук в воздухе
$10^1$ бегун
$10^0 = 1$ пешеход
$10^{-1}$ волны на воде
$10^{-2}$ черепаха
$10^{-3}$ улитка
$10^{-6}$ рост дерева
$10^{-9}$ дрейф материков

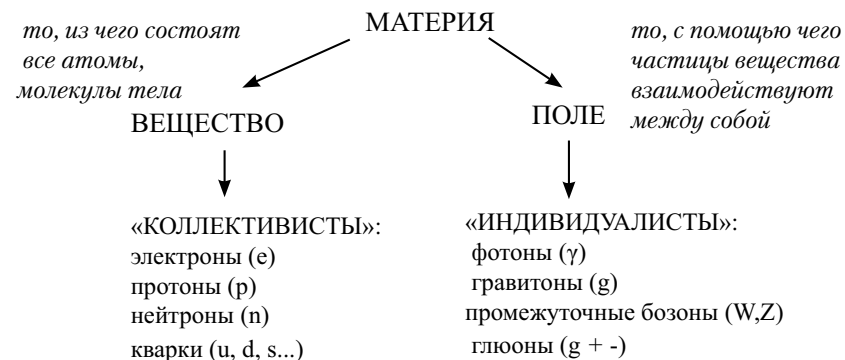
Наш опыт говорит нам то, о чём давно предупреждали умные древние греческие люди:

**всё, что есть в мире, состоит из набора микрочастиц.**

Если эти микрочастицы собраны, грубо говоря, погуще, то они образуют *вещество* — твёрдое, жидкое или газообразное. Но всё устроено природой ещё и так, что *не любые* частицы *в принципе* могут собираться вместе, погуще. (Скажем, дирижер оркестра обречен на многолюдное регулярное общение. А композитор — наоборот: обычно работает в одиночку. На то есть свои понятные причины.) Но оказалось, что и в мире микрочастиц есть свои «коллективисты». Именно из них составляются отдельные атомы, из атомов — молекулы и макротела. Мы можем даже огласить практически весь список частиц, из которых построено *вещество* во Вселенной: *электроны* (краткое обозначение:  $e$  с черточкой сверху), *протоны* ( $p$ ), *нейтроны* ( $n$ ) и *кварки* (несколько видов).

Другие микрочастицы играют во Вселенной другую роль. С их помощью частицы вещества взаимодействуют между собой. Если представить себе электроны, протоны, нейтроны и кварки в виде каких-то маленьких шариков (хотя это и не так!), то другие частицы — *фотоны*, *гравитоны*, *пионы* и *глюоны* — играют роль своеобразных пружин или верёвочек, или клея, передающего влияние одной частицы вещества на другую, одного атома на другой и даже одной звезды на другую. Набор этих других частиц образует то, что называется *полем*. В поле частицы расположены пореже, чем в веществе. Кроме того, все частицы, составляющие поле, являются индивидуалистами — не любят и даже не могут собираться вместе, в одном и том же состоянии.

Чтобы легче уложить весь этот набор имен в голову, нарисуем такую схему:



Все виды *взаимодействий* частиц вещества между собой сводятся всего к *четырем* видам:

### **ВИДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ:**

1. *Гравитационное* — притяжение всех частиц (и любых тел) друг к другу; «работает на любых расстояниях».

2. *Электромагнитное* — оно отвечает за существование у тел формы, упругости и т. д.; самое главное взаимодействие в нашем мире макротел.

3. *Ядерное* — отвечает за взаимодействие частиц ядра, без него не было бы ядер у атомов; заметно только на малых расстояниях — порядка размеров ядра.

4. *Слабое* взаимодействие — оно отвечает за превращение одной микрочастицы в другую; заметно лишь на ужасно малых расстояниях (даже меньше, чем у ядерного!).\*

**Вопрос 89:** Какого порядка размер ядра (в см)?

*Взаимодействие* — это примерно то же самое, что раньше называли *силой* (да и сейчас ещё часто называют — по привычке). Так вот, считалось, что в природе есть довольно много разных сил: сила тяжести (притягивает любое тело к Земле), упругая сила (не позволяет кружке с чаем проваливаться сквозь стол), сила сопротивления (помогает прыгать с парашютом и мешает быстро плыть в воде), электрическая (создает электрический ток), архимедова (выталкивает пробку из воды), трения — известна всем... Остановимся. Оказалось (размышления навели на предположения, подтолкнули к созданию теории, а опыты подтвердили), что все силы в принципе сводятся лишь к четырем основным (или фундаментальным). Их имена смотри выше.

**Вопрос 90:** *Сила трения* — на самом деле — что это за сила?

**Вопрос 91:** (Это трудный вопрос!) *Архимедова сила* — как её истинное имя?

---

\* Строго говоря, физики установили, что электромагнитное и слабое взаимодействия можно считать двумя частными случаями одного взаимодействия — электрослабого. Более того, большинство специалистов уверены в том, что обоснование тройного объединения — электро-слабо-ядерного взаимодействия — вопрос только времени. А вот насчёт присоединения к ним гравитации — вопрос, по меньшей мере, открытый. Может быть, кто-то из вас внесёт кусочек ясности в этот вопрос?

**Вопрос 92:** Загадка Корнея Чуковского (для тех, кто в детстве читал мало или невнимательно):

*Две ноги на трёх ногах, а четвёртая — в зубах.*

*Вдруг четыре прибежали и с одною убежали.*

*Подскочили две ноги, подхватили три ноги,  
закричали на весь дом, да тремя по четырём!*

Что это такое?

## 12. ЧЕМ ПОЛЬЗУЮТСЯ ФИЗИКИ В СВОЕЙ РАБОТЕ

**Вопрос 93:** А что бы потребовалось вам? Составьте список.

### 12.1. ПРИБОРЫ

Поскольку главный физический судья — это опыт, то, прежде всего, позаботимся о том, что необходимо для эксперимента. Зачем нужны приборы? Можно сказать так: чтобы как-то «потрогать» исследуемый объект (электрон, атом, кристалл, воду, Луну...).

Но как можно потрогать Луну? Лучом света! Мы, например, знаем, что расстояние до Луны составляет  $(373\,787\,265 \pm 4)$  м. Как это узнали? Сначала доставили на Луну отражатель — кусочек металлического зеркала. А потом с Земли послали луч лазера, который дошёл до отражателя и вернулся в приёмное устройство. Зафиксировали время путешествия луча и, зная скорость света, посчитали расстояние. Как видите, это было сделано с громадной точностью — с точностью до 4 м! Обратите внимание на то, как мы записали этот результат — мы указали не только само расстояние, но и погрешность, с которой мы его получили. На самом деле такая запись означает следующее: мы (наш эксперимент) утверждаем, что расстояние до Луны находится в пределах от 373 787 261 м до 373 787 269 м. Результат любого эксперимента всегда указывается с погрешностью, потому что она — тоже следствие того, как был поставлен опыт: какой использовался лазер, как был установлен отражатель, даже какая была погода в момент опыта. Понятно, что по возможности стараются сделать несколько однотипных опытов, а потом усреднить их результаты.

**Вопрос 94:** Что бы вы сказали, если бы вам предъявили такой результат измерения: длина ручки =  $(15,000 \pm 0,001)$  см? Измерьте длину вашей пишущей ручки и укажите результат. Не забудьте про погрешность. Помните: погрешность указывает на пределы, в которых вы *отвечаете* за правильность результата!

**Вопрос 95:** Иногда в работах моих учеников я встречаю такие ответы: длина прыжка кенгуру равна 11, 274844333 м. На вопрос — *Откуда такая точность?* — обычно следует ответ: *Это калькулятор сосчитал!* Как мне реагировать на такое заявление? Можно ли считать такой ответ в физической задаче правильным?

**Вопрос 96:** Кстати, если измерять расстояние с точностью до 4 м, то ни Землю, ни Луну нельзя считать материальными точками...

**Вопрос 97:** Помните, что такое материальная точка?

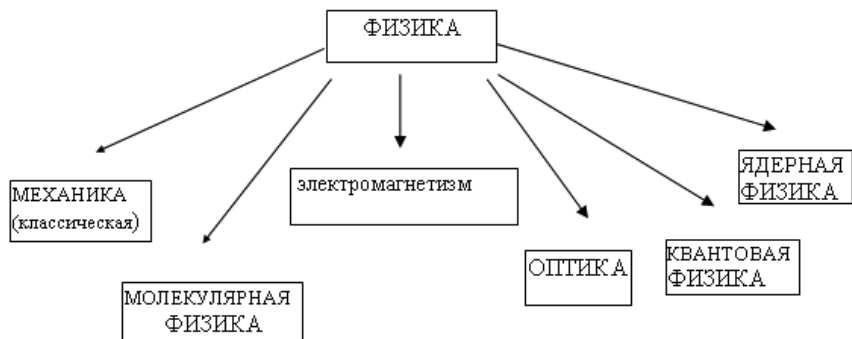
**Вопрос 94:** (*продолжение*) ...Но тогда от какой точки Земли до какой точки Луны было измерено расстояние?

Как ещё можно «потрогать» то, что изучаешь? Очень часто пользуются бомбардировкой объекта подходящими снарядами. Идея очень проста: если мы хотим выяснить, есть ли в стене окна, проще всего начать кидать в неё камни. Тогда даже в темноте и на большом расстоянии мы — по звону разбитого стекла или по комментариям обитателей дома — сможем получить ответ на наш научный вопрос. Кстати, если взять хорошие, круглые камешки, то долго кидая их в стенку, можно установить её форму (если нам это интересно) и т. д.

Именно такова была идея классического опыта Эрнеста Резерфорда, когда он с 1908 по 1911 год бомбардировал листок золотой фольги (тонкий слой атомов) потоком так называемых  $\alpha$ -частиц. И обнаружил, что атом почти полностью пуст! Существует лишь ужасно *плотное* (99,95% массы всего атома!) и ужасно маленькое (с радиусом в 100 000 раз меньше, чем у атома) — *ядро*. Плюс набор легчайших частиц — электронов, «кружащихся» вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца.

Другой популярнейший способ «потрогать» с целью изучения — это, так сказать, «понюхать» объект — уловить его характерный «запах», точнее — его индивидуальное излучение. И по виду этого излучения установить: из чего состоит предмет X, сколько в нём чего, каковы параметры вещества (температура, состояние...). Необходимый для этого «нос» называют *спектрометром*, потому что он даёт возможность получить *спектр* данного вещества.

Ещё один способ изучения — «подогрев» того, что нас интересует. Каким образом психолог распознает натуру человека? Часто



он задаёт вопросы, провоцирующие объект на такое поведение, которое он в обычной ситуации скрывает, контролирует себя. А уже из анализа поведения можно сделать нужные выводы: нетерпелив, честолюбив, аккуратен, любит делать поспешные выводы, но обаятелен... То же самое можно сделать с микрочастицей в ускорителе: при обычных скоростях и энергиях протон совсем не так интересен, как после того, как его миллион раз прогонят по кругу километровой радиуса.

Мы вовсе не исчерпали все методы физического эксперимента, но мы и не ставили перед собой такую задачу.

## 12.2. МАТЕРИАЛЫ

Под материалами мы имеем в виду не только то, что мы изучаем. Понятно, что кристалл кремния совершенно необходим при изучении его способности проводить электрический ток. И здесь очень часто проблема состоит в получении очень «чистого» объекта. Физикам известны многие случаи, когда присутствие одного постороннего атома среди ста тысяч основных меняет способность материала проводить ток в сто тысяч раз! А иногда необходимо наоборот — чтобы считанное число чужих атомов расположилось нужным образом среди тьмы основных.

Такие сильные требования вызвали даже появление ещё одной разновидности физиков — появились физики-технологи, они изготавливали структуры со свойствами, которые им заказывали

физики-экспериментаторы. А те, прежде, чем принять решение, советовались с теоретиками.

Но материалы — это и более простые вещи: проволока, азот, гелий, вода...

## 12.3. КОМПЬЮТЕР

Совсем недавно (я успел застать это время) компьютер (его тогда называли ЭВМ — электронная вычислительная машина) был инструментом не физиков, а программистов. По крайней мере, стояли эти *шкафы* не в лаборатории и, разумеется, не дома, а в специальном помещении, которое называлось Вычислительным Центром...

Точно известен день и место рождения персонального компьютера: 26 мая 1977 года двадцатипятилетний прожжённый хиппи Стивен Джобс и математический вундеркинд Стефан Возняк двадцати одного года от роду в чужом гараже повернули тумблер включения того, что они назвали *Apple 1*...

Некоторое время назад присутствие нескольких персоналок в одной комнате (наряду с экспериментальными установками) было признаком того, что здесь занимаются физикой. Сегодня персоналки — скорее признак офиса, школы, завода... Да чего угодно!

Что такое компьютер для физика? Мощный калькулятор? Конечно. В ряде случаев, особенно в ядерной физике, без его *вычислительной поддержки* просто не обойтись. Но не только. Компьютер бывает необходим для управления приборами в момент сложного опыта, тогда, когда человек не успевает, не может «разорваться», не имеет доступа внутрь происходящего. И это называется *автоматизация эксперимента*.

Часто, вместо реального эксперимента, создают его математическую модель и «проигрывают» её в компьютере — это называется *компьютерное моделирование* физических процессов. При этом возникает возможность медленно и подробно рассмотреть такие детали эксперимента, которые ускользают в настоящем опыте. Можно сказать, что компьютер выступает в роли управляемого «оживителя» происходящего.

Но, возможно, самое главное по поводу компьютера высказал не физик, а знаменитый писатель, Габриэль Маркес: «*Это совсем другой стиль творчества*». А один физик добавил: «*Это совсем другой стиль жизни*». (Может быть, не очень понятно, но точно.)

## 12.4. РУЧКА, БУМАГА, ДОСКА

Зачем всё это при наличии компьютера? (Уже появились вполне карманные — или, как минимум, внутрисумочные — компьютеры-блокноты (планшеты).) Среди физиков стала популярной фраза: «Давненько я не брал в руки ручки...». Не будем спорить: всё возможно. Но пока трудно представить себе физика без бумаги и ручки. Привычка? Может быть... По моим наблюдениям физики до сих пор чаще всего свои расчёты ведут на бумаге. А слова можно набрать и на клавиатуре. Впрочем, за всех не поручусь.

То же самое касается и доски с мелом. Во-первых, она уже в большинстве случаев не с мелом, а с фломастером (если не сенсорная!)... Во-вторых, на семинарах и совещаниях теперь обычно пользуются проектором с презентациями. В-третьих, всех их уже скоро вытеснит... ещё не знаю кто.

Однако, как именно работает физик? По-разному. Чаще всего, как говорят социологи, в малых группах: вдвоём, втроём — встречаются в назначенное время, разговаривают, пользуются доской — так удобней!, проводят так час, два, пять часов, пьют чай или кофе, снова расходятся, иногда на неделю, чтобы поработать это время в одиночку: теоретик — дома, экспериментатор — в лаборатории. Экспериментаторы, работающие над одной проблемой, обычно образуют группу: чаще всего из двух человек — старшего и младшего, но бывают группы в пять-шесть сотрудников — всё зависит от области физики и от задачи. Семинары, где кто-то рассказывает о своих или чужих, но чем-то интересных результатах — тоже элемент работы физика. Это не только набор информации, но и способ поддержки своих мозгов в форме. И потом бывают идеи и решения, приходящие по аналогии, из других задач, областей и даже наук. Я не говорю о собственных выступлениях и подготовке публикаций. Не только ты должен знать научный мир, но, по возможности, и он тебя.

**Вопрос 98:** Каков же *главный* инструмент физика?

**Ответ 98:** Правильный ответ: голова. Но следующее по значимости — за-  
дница, сидячее место. Понятно, почему?

## 12.5. КНИГИ, ЖУРНАЛЫ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ

Большинство физиков много читает. Обычно они имеют привычку держать много книг даже дома. В том числе и по физике. У меня есть книги, которые я впервые попробовал читать ещё в школе, прочитал впервые — в университете, а пользуюсь для уточнения — до сих пор. Важно понимать, что практически нет универсальных учебников — таких, которые годятся для любого человека.\* Но: всегда можно найти (подобрать) книгу, подходящую именно для вас. Более оперативная и специализированная информация есть в журналах. Правда, сегодня её (информацию) чаще выуживают из интернета. Но для этого тоже должна быть привычка: регулярно проверять соответствующие сайты, просматривать новые номера журналов — как большинство населения следит за программой телепередач или прогнозом погоды.

**Важно отметить**, что есть два этапа обучения: через усвоение «чужой», не тобой полученной информации (чтение, слушание, обсуждение) и через создание собственной, полученной уже тобой (размышление над увиденным и услышанным, переработка его).

Как минимум, следует четко понимать, что:

- почти всегда можно найти соответствующую (проблеме) книгу (статью, заметку);
- при должной настойчивости в ней можно разобраться.

**Вопрос 99:** Как практически отлить ровно половину из бутылки Pepsi? Оцените точность такой операции теоретически. Проведите эксперимент и сравните его результат с теоретическим.

**Вопрос 100:** Винни-Пух и Пятачок отправляются на загородную прогулку и берут с собой кое-что перекусить. Проблема в том, что Винни любит салат с уксусом, а Пятачок — с оливковым маслом. Но две бутылки они брать не хотят — тяжело. Как им поступить?

\* Возможное исключение — третий том курса Ландау и Лифшица — для любого физика-теоретика.



### 13. ФИЗИКА СОСТОИТ ИЗ

Был в истории Европы такой замечательный период (с XIV-го по XVI-ый век), когда человечество «рвануло» (за триста лет!) из Средневековья в Новое время. Этот период называется Возрождение (Ренессанс). Так вот, даст ли вам что-то новое такая информация: Возрождение условно делится на *Раннее*, *Высокое* и *Позднее* — ? Сомневаюсь. Тем не менее, скажу, что по традиции и договоренности, т. е. *условно*, физика делится на отдельные области, имеющие своё название, свои задачи, часто свои методы (и обычно — свои экзамены).

Классическая механика изучает движение макроскопических тел, а квантовая теория — движение микрочастиц. Молекулярная физика интересуется тепловыми явлениями, а оптика — поведением и природой света. Что касается электромагнетизма и ядерной физики — то здесь всё понятно из названия.

Что касается Возрождения, то возможно о нём больше скажет перечень имен тех людей, которые творили в этот период: Рабле, Шекспир, Сервантес, Эразм, Монтень, а также — Леонардо, Рафаэль, Микельанджело, Дюрер, Брейгель...

А вот типичные *примеры задач*, которые рассматривают в физике:

- Как высоко полетит камень, брошенный вверх? Когда он упадёт?
- Через какое время остынет (до комнатной температуры) чай, налитый в чашку?
- Какой массы бумажку можно поднять расчёской, потёртой о волосы?
- Почему бассейн нам кажется мельче, чем он есть на самом деле?
- Почему электрон не падает на ядро?
- Как ядро может излучать электроны, если они не входят в состав ядра?

А теперь отдохнём:

**Вопрос 101:** Полисмен остановил мотоциклиста, проехавшего 30 миль за 30 минут. «Я вынужден тебя оштрафовать за превышение разрешённой скорости 70 миль в час. Мне особенно жаль это делать, потому что ты — мой сын, хотя я — тебе не отец.» И полисмен выписал квитанцию... Как такое могло быть?

ЭНЕРГИЯ

# 1. ЧТО ТАКОЕ ЭНЕРГИЯ

## 1.1. САМАЯ-САМАЯ

Если бы нам разрешили *знать* что-нибудь *одно* про какое-нибудь тело, частицу, набор тел (физики говорят «система тел»), то мы выбрали бы ЭНЕРГИЮ.

Скажите мне, какова энергия частицы, — и я, не трогая её руками или приборами, даже не глядя на неё (тем более что часто это невозможно), смогу кое-что рассказать про её нынешнее поведение и даже предсказать — как эта частица поведёт себя в какой-то ситуации, останется ли она в покое или сдвинется с места, а если сдвинется, то в каком направлении, и как долго будет двигаться, «захватит» ли её по пути другая частица или она исчезнет, а родится новая частица, породит ли моя частица свет или вызовет звук, нагреется она или охладится...\*

Именно поэтому мы начинаем наше знакомство с физическими понятиями и законами с энергии, хотя казалось бы, в физике есть вещи и попроще. Но похоже, что в физике, как и в жизни, не бывает и лучше, и дешевле сразу, за всё надо чем-то платить.

## 1.2. ФИЗИКА РАСЧЁСКИ

И всё-таки: *что же такое энергия?* Про человека говорят, что он энергичный, если он делает что-то больше других, быстрее, или хотя бы *может* сделать. Можно сказать, что у энергичного человека «внутренняя батарейка» заряжена лучше, чем у других. Что его «пружина» сильнее сжата. Что его «моторчик» больше раскручен, а «котёл» подогрет сильнее, чем у других. Энергия — способность тела что-то делать? Работу? Но что такое работа? Усилие? Движение? Остановимся и подведем первые **ИТОГИ:**

- энергия — самое общее и самое содержательное понятие в физике;\*\*

\* Иногда наши предсказания будут верными не на все 100%, но тогда мы сможем (и будем) указывать, на сколько именно они будут верными: с вероятностью 80% эта частица вызовет излучение света.

\*\* Это утверждение мы приняли на веру, и, видимо, нам предстоит ещё убедиться в том, что оно действительно справедливо.

- энергия как-то связана с «работой»;
- энергия — непростое понятие.

Может быть, легче привести ПРИМЕРЫ? Скажем, на вопрос «Что такое число?» можно ответить так: «Это один, два, три, четыре...».

**Вопрос 1:** Математик наверняка уточнил бы наш ответ: это ... числа. И, чуть помедлив, добавил бы: Это ... .. числа. Какие слова использовал математик?

**Вопрос 2:** «Что такое дерево?» — это вопрос к биологу. Его ответ?

**Ответ 2:** Дерево — растение со стволом и ветвями.

Но оставим математика заниматься его любимым делом — делать и так ясные вещи ещё яснее. Возьмём обычную пластмассовую расчёску и поищем в ней различные энергии.

**а)** Согнём расчёску, но осторожно, чтобы её случайно не сломать, и будем удерживать пальцами в таком положении. А теперь поднесём согнутую расчёску ко лбу и отпустим. Расчёска «сработает» — щёлкнет вас (или вашего ассистента) по лбу. И это значит: согнутая расчёска имела **УПРУГУЮ энергию**. Откуда она взялась у расчёски? Мы сами её *запасли*, согнув расчёску. В природе все честно: поработал — получи энергию (вместо денег, как это принято в мире людей).

**б)** Снова возьмёмся за расчёску двумя руками и попробуем её быстро сгибать-разгибать. Вскоре в районе сгиба она станет тёплой. Конечно, её тепла не хватит даже для того, чтобы очень маленькую льдинку из холодильника превратить в воду, но всё же оно (тепло) есть — его легко почувствовать, коснувшись расчёски носом.\* Итак, расчёска получила **ТЕПЛОВУЮ энергию**. Откуда? Опять мы поработали-сгибали туда-сюда.

**Вопрос 3:** А мы откуда взяли энергию для нашей работы?

**Ответ 3:** Если мы сгибали расчёску где-то в 11 утра, значит — хорошо позавтракали. (Без шуток: наша энергия, энергия наших мышц — результат «обработки» нашим организмом съеденных продуктов.)

**в)** А теперь просто поднимем расчёску повыше и отпустим её. Если она упадёт, например, в тарелку с водой, будут брызги:

\* Разумеется, если у вас повышена температура, то этот способ не пройдёт..

нам удалось «передвинуть» часть воды при помощи поднятой над землёй расчёски (чем выше — тем больше брызг). Поэтому: поднятая над землёй расчёска имеет **ГРАВИТАЦИОННУЮ энергию**.

(Не следует пугаться слова «гравитационная» — это всего лишь имя этой энергии.) Откуда она взялась? Опять же не сама по себе — кто-то поработал — поднял расчёску повыше (известно кто).

**г)** Самая очевидная энергия — *энергия движения*. Бросьте вашу расчёску (горизонтально, чтобы не тревожить энергию из предыдущего пункта) — всякий, кто окажется на её пути (и попытается её остановить), должен будет согласиться, что у неподвижного тела одни возможности поработать, а у движущегося — совсем другие. Такая энергия тела называется **КИНЕТИЧЕСКОЙ**.

**Вопрос 4:** А разве падающая расчёска не обладает кинетической энергией? Или у неё есть только гравитационная?

**Ответ 4:** Сначала у поднятой над землёй расчёски энергия — чисто гравитационная. Но в процессе падения она постепенно переходит в кинетическую. В момент столкновения с водой кинетическая энергия расчёски переходит в энергию движения капелек воды, ещё во что-то (тепло?). Но всё это смогло произойти только за счёт того, что первоначально *мы* (тот, кто поднял расчёску) запасли у неё гравитационную энергию.

**Вопрос 5:** Если во время падения расчёски я (мысленно!) сяду верхом на неё и как-то измерю её кинетическую энергию — не получу ли я ноль для энергии падения расчёски?

**Ответ 5:** Получите. Это означает, что кинетическая энергия зависит от «точки зрения» наблюдателя на движущееся тело.

**д)** А теперь употребим, наконец, расчёску по назначению — причешемся.

И сразу после этого поднесём её к заранее приготовленным маленьким клочкам бумаги (размером не более 1 см).

**Вопрос 6:** Что будет? Прodelайте этот опыт.

Надеюсь, вы убедились, что после причёсывания расчёска стала обладать новой, дополнительной *способностью* производить работу — после причёсывания у расчёски появилась **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ энергия**.

**Вопрос 7:** А у ваших волос?

**Ответ 7:** Тоже! Конечно, требуется эксперимент. Какой?

**е)** В заключение согнём расчёску посильнее и... сломаем её.

**Вопрос 8:** Кто впервые сказал: «Наука требует жертв»? Вы согласны с этим? Подумайте.

Впрочем, эксперимент вполне может быть и мысленным. Физики часто так поступают (чтобы сэкономить на расчёсках).

...Чтобы сломать расчёску, нам пришлось употребить усилие, поработать. Значит, что-то нам мешало, что-то связывало части расчёски друг с другом, какая-то «пружинка». И *при случае* эта «пружинка» могла бы и сработать. (Например, щёлкнуть вас по лбу.)

Значит, и в этом случае расчёска обладала **УПРУГОЙ** энергией, а мы её куда-то подевали? Энергию связи одних частей расчёски с другими действительно можно назвать упругой, т. е. эта та же энергия, что и в п. **а)**, но мы её никуда не дели, а просто изменили, поработав для слома расчёски.

**Вопрос 9:** Что же получается: сломав расчёску, мы её энергию (связи одних её частей с другими) уменьшили и свою энергию потратили тоже (на ломание). Кто же получил энергию, куда она делась?

**Ответ 9:** На самом деле после слома расчёски её энергия (связи одного отломанного куска с другим) увеличилась! Хотя и стала нулевой.

**Вопрос 10:** Разве так бывает?

**Ответ 10:** Если вы были должны 100 рублей (т. е. у Вас было минус 100), а я отдал долг вашему кредитору, то, хотя у вас стало 0 рублей, ваше благосостояние *увеличилось*. Мораль: видимо, энергия связи частей расчёски была отрицательной. А мы в результате ломания передали часть нашей (мышечной) энергии расчёске (ее двум кускам). Энергия расчёски стала менее отрицательной — нулевой, т. е. увеличилась.

### 1.3. НАШ ЛУЧШИЙ ДРУГ — СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Хотя в расчёске есть и другие виды энергии, настало время подвести очередные итоги.

## ИТОГИ :

- существует много разных видов энергии (кинетическая, гравитационная, электрическая, упругая,\* тепловая...);
- одно и то же тело может иметь *одновременно* много разных энергий (обычно так и бывает — спускающийся парашютист имеет: кинетическую, гравитационную, тепловую — нагрев из-за сопротивления воздуха);
- **наличие одних видов энергии не мешает существованию других!**
- но обычно в конкретном процессе заметно меняется один из видов энергии (нагрев расчёски — тепловая) или два (падение расчёски — кинетическая и гравитационная); это позволяет выделить и измерить (или сосчитать) энергию, которая «отвечает» за происходящее, определяет картину явления;
- **один вид энергии может переходить в другой.**

**Вопрос 11:** Приведите примеры переходов энергии из обычной жизни (людей, животных, растений).

- Но самое поразительное, что

### ЭНЕРГИЯ НИКУДА НЕ ПРОПАДАЕТ:

если уменьшилась электрическая энергия, можете быть уверены, что выросла какая-то другая или другие, в любом случае их *общая сумма останется той же!*

**Вопрос 12:** Можно ли сказать, что сумма всех видов энергий тела (скажем, камня) не меняется?

**Ответ 12:** Если это тело «живёт» само по себе, отдельно от других, никого «не трогает», и на него никто из других тел не действует, — тогда можно.

**Вопрос 13:** А реально так бывает?

**Ответ 13:** Строго говоря, нет. Но чаще всего нам просто некуда деваться: или мы чем-то **пренебрежём** (взаимодействие камня с воздухом), или мы вообще ничего не сможем сказать о его движении. Недаром говорят, что физики создают не фото окружающего мира, и даже не его пейзаж, а шарж на него. Как обычно, шаржи бывают удачные и неудачные, узнаваемые и нет. Всё зависит от мастерства художника. Обычно считают, что тело изолировано от влияния других тел, если оно находится достаточно далеко от них. Например: части вашей расчёски от планеты Юпитер (или даже от

\* Позже мы увидим, что то, что мы назвали упругой энергией, по сути дела является тоже электрической энергией.

Луны). Если же тело с кем-то взаимодействует (камень с Землёй, камень с воздухом...), то не меняется общая сумма всех энергий всех тел, взаимодействующих между собой.

Это удивительное СВОЙСТВО ЭНЕРГИИ — СОХРАНЯТЬСЯ, что бы ни происходило, — и есть то главное, из-за чего мы так ценим это понятие.

Всем понятно, почему мы ценим постоянство в дружбе и любви — верность друг другу. *Энергия — наш «самый верный друг» в физике.* Все опыты, когда-либо и где-либо проводившиеся, говорят, что это так.

## 1.4. КУБИКИ, КОТОРЫХ НЕТ

Замечательный образ «сохранения энергии» придумал Ричард Фейнман в знаменитых Фейнмановских Лекциях по Физике — мальчик, играющий в кубики, число которых не меняется, куда бы он их ни прятал (под ковёр, в стиральную машину, у соседского мальчика...)\*. Обязательно прочтите это место.\*\*

И всё-таки, что такое энергия?

Фейнман пишет так: *единственное, что мы по-настоящему знаем про энергию, — это то, что она сохраняется!*

**Обратите внимание:**

*в физике, если что-то сохраняется (не меняется со временем), — это повод обратить на это «что-то» внимание!*

*Пример:* замечено, что в нашем городе в половине четвёртого регулярно идёт дождь. Почему стоит обратить внимание на «сохранение времени начала дождя»? Ну, например, тогда мы знаем, что не стоит назначать начало футбольного матча на это время, если он должен проходить под открытым небом. А вот семинар по физике — пожалуйста.

**Вопрос 14:** Подумайте, что значит следующее замечание Фейнмана: «На самом деле никаких кубиков нет».

Попробуем разобраться во всём разнообразии энергий.

\* Я недаром употребил слово «образ» применительно к «сохранению энергии». (Лев Толстой создал образы Пьера и Наташи в «Войне и мире».)

\*\* The Feynman Lectures on Physics, vol. 1, chapter 4, 4-1 (самое начало). Русский перевод: ФЛФ, выпуск 1, глава 4, изд. 3-е — 1977.

## 2. КИНЕТИЧЕСКАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

### 2.1. ЭНЕРГИЯ ДВИЖЕНИЯ

Любое тело может либо покоиться, либо двигаться.\* Интуитивно ясно, что движущееся тело «более энергично»: оно может нагреть поверхность какого-то другого тела (за счёт трения), произвести какие-то разрушения (при столкновении), сильнее сжать пружину, стоящую на его пути, глубже погрузиться в воду или, наоборот, взлететь над землёй.

**Энергия движения тела — особый вид энергии.**

Её называют **кинетической** энергией ( $E_k$ ).

### 2.2. ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ $E_k$

#### а) Относительность кинетической энергии

**Вопрос 15:** Возможна ли такая ситуация: один человек говорит, что у тела есть кинетическая энергия, а другой, что её нет, и оба правы?

**Ответ 15:** Конечно: если я еду в машине, то она не движется *относительно меня*. Значит, у неё нет энергии движения *относительно меня*. Но, конечно, относительно вас, *стоящего* на обочине, у машины будет кинетическая энергия.

**Вывод:** кинетическая энергия зависит от выбора предмета, *считающегося* неподвижным.

**б)** А от каких **характеристик** (параметров) **самого движущегося тела** может зависеть его кинетическая энергия?

Конечно, *от скорости тела*.

И всё? Пусть медленно катящийся асфальтиrovочный каток и бегущий рядом с ним человек имеют одинаковую скорость. Будет ли у них одинаковая энергия движения? При столкновении со

\* Оказывается, не любое! Существуют частицы-непоседы по имени «фотоны», их судьба — вечное движение с одной и той же громадной скоростью — примерно 300 000 км/с (в вакууме).

стенкой они одинаково толкнут её? Логично было бы, чтобы у катка была значительно большая  $E_k$ , чем у человека. То есть: кинетическая энергия тела должна зависеть **от его массы  $m$** . Мы не будем пока уточнять, что такое масса тела. До поры до времени будем считать, что все знают, о чём идёт речь, когда говорят, что «Ваш чемодан в 50 кг весит больше, чем моя сестра-гимнастка!». Здесь слово **весит** является устаревшим, неточным. На самом деле 50 кг — это и есть масса чемодана. То есть пока для нас это что-то вроде показателя количества вещества в теле.

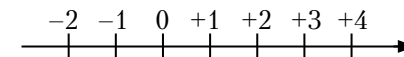
**Итак:**

*кинетическая энергия тела должна зависеть от его массы и от его скорости.* Запишем это кратко так:  $E_k = f(m, v)$ \* — кинетическая энергия является **функцией** массы и скорости тела. Какой именно функцией (т.е. как именно зависит) — это отдельный вопрос. Ну, например:  $E_k = mv$  или  $E_k = mv^2$ .

### 2.3. ВИД ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИММЕТРИИ)

**Вопрос 16:** Нельзя ли из общих представлений об энергии и здравого смысла выбрать что-то одно из:  $E_k = mv$  и  $E_k = mv^2$ ?

**Ответ 16:** Можно. Но придётся запастись терпением. Знаете ли вы, как изображают на рисунке положительные и отрицательные числа? Вот так:



В виде меток на прямой со стрелкой. Стрелка указывает направление, которое мы *выбрали* за положительное. А теперь пусть две пули летят с одинаковыми по величине скоростями,\*\* но в противоположных направлениях.

Если скорость одной из пуль мы обозначим через  $V$ , то как нам следует обозначить скорость другой? Правильно:  $-V$ , ведь скорость (в отличие, скажем, от температуры или массы) — это не только величина (100 км/ч), но и направление (на север или по Киевскому шоссе). Ведь для нас важно не только то, с какой скоростью приближается к нам машина, но и с какой стороны — слева или справа она выезжает на перекрёсток.

\* Читается « $f$  от  $m, v$ ». Сравните: «Успех является функцией Настойчивости, Знаний и Удачи». Коротко:  $Ус = f(Н, З, Уд)$ .

\*\* Какова примерно скорость пули?

## СКОРОСТЬ = ВЕЛИЧИНА + НАПРАВЛЕНИЕ \*

Итак, у нас есть две пули со скоростями  $V$  и  $-V$ . Тогда они будут иметь кинетические энергии  $mv$  и  $-mv$  по первому варианту или  $mv^2$  — одну и ту же — по второму, ведь  $E_k = m(-v)(-v) = mv^2$ .

**Вопрос 17:** А может ли в принципе энергия быть отрицательной?

**Ответ 17:** Может. Если сейчас в нынешнем состоянии) моя энергия равна минус 10 каких-то единиц (назовем их джоулями), то это означает, что: если до того (в предыдущем состоянии) я имел минус 8 Дж, то я на что-то *потратил* 2 Дж, ведь  $E$  (стало)  $- E$  (было)  $= (-10) - (-8) = -10 + 8 = -2$ ; а если у меня было минус 12 Дж, то я *получил* от кого-то  $(-10) - (-12) = -10 + 12 = 2$  Дж. Вот и всё.

*Другими словами*, надо выбрать между вариантом, когда противоположно летящие пули имеют  $E_k$  одна  $+10$  Дж, а другая  $-10$  Дж, и вариантом, когда они обе, *независимо от их направления*, имеют по  $10$  Дж. По сути, перед нами выбор: энергия (как и скорость) — это тоже «величина + направление» или *только «величина»?*

Проведем мысленный эксперимент. Представим себе, что обе пули попадают (поочередно) в один и тот же маятник — висящий на нити кусок пластилина — и застревают в нём. Пластилин немного деформируется, нагревается, маятник начинает качаться, потом (из-за сопротивления воздуха и т. д.) постепенно замедляется и останавливается: энергия движения налетевшей пули перешла в тепловую энергию (она «принадлежит» пластилину, пуле, воздуху (он ведь тоже чуть нагрелся), частично нити подвеса). Спрашивается: сумма всех этих тепловых джоулей будет зависеть от того, откуда налетела пуля — справа или слева? Конечно, нет! Но может быть знак  $+$  или  $-$  перед числом джоулей — это просто информация о направлении, откуда налетела пуля? Разумеется. Но в том-то и дело, что в конце концов такой информации не остаётся: в обоих случаях висит себе одинаково нагретый маятник — и всё. вы скажете, а дырка от входного отверстия — она-то будет с какой-то одной стороны! В случае с пулей вы правы. Но представьте на месте пули иголку, влетающую в кусок ваты. Сможете вы определить (потом, когда иголка уже «уляжется» спокойно), откуда она влетела? — Я не смогу, но, возможно, хороший эксперт-криминалист сможет. Ведь главное, чтобы это *в принципе* было возможно (при наличии ужасно точных или мощных приборов, достаточного

количества времени или денег и т. д.). Хорошо, оставим в покое пули с маятником. Возьмём сосуд с водой и будем его нагревать (зажигалкой) — один раз слева, а другой — справа. Сначала, конечно, эти две передачи энергии будет легко различить: какой бок сосуда теплее — с той стороны и подают тепловую энергию. Но: спустя какое-то время температура в сосуде установится одна и та же в любой его части! И вот тогда у Вас не останется ни одной «дырки» для определения «направления энергии».

Вспомните ещё раз пример Фейнмана с кубиками: единственное, что мы знаем, это то, что число кубиков всё время одно и то же, т. е. что энергия сохраняется. А откуда и куда она будет передана — этой информацией энергия не владеет.\* Поэтому:

**ЭНЕРГИЯ = только величина!**

Поэтому  $E_k = mv^2$  подходит под наше понятие об энергии, а вариант с  $mv$  не подойдёт.\*\*

*Проанализируем:* как же мы пришли к выбору выражения для  $E_k$ . Фактически мы в ходе мысленного эксперимента обнаружили некоторое замечательное *свойство энергии тела* — её **СИММЕТРИЮ** (одинаковость) по отношению к направлению её «доставки». Отсюда и последовал вывод: скорость  $V$  в выражении для  $E_k$  должна быть именно в квадрате, а не в первой степени.

Такой приём решения физической задачи — **использование имеющейся в данной ситуации симметрии** — один из самых популярных приёмов у физиков.

**Вопрос 18:** Итак,  $E_k = mv^2$ ? А почему не  $E_k = mv^4$ ? Или не  $E_k = m^2v^2$ ? Наконец, почему не  $E_k = mv^2/2$ ?

**Ответ 18:** Ни на один из этих вопросов мы не сможем дать удовлетворительный ответ. Но не потому, что этого ответа не существует, а потому, что пока наших знаний не хватает для его понимания. Не всё сразу! (Нью-Йорк тоже не сразу строился.) Вот правильное выражение для кинетической энергии:

$$E_k = mv^2/2^{***}$$

\* Вопрос о направлении передачи энергии решается другой физической величиной — *энтропией*.

\*\* Тем не менее, мы не зря «познакомились» с такой штукой, как произведением массы тела на его скорость. Она нам ещё очень даже пригодится.

\*\*\* Уточним, что речь идет об энергии собственно движения тела, без учёта того, что одновременно, «в полёте», оно может ещё как-то вращаться вокруг своей оси, «дрожать» — колебаться и т. д. В этих случаях кое-что добавится к указанному выражению для  $E_k$ . Не всё сразу!

\* Позднее мы увидим, что эта формула — неполная, но пока нам её будет хватать.

Итак, в *простейшем случае* тело массы  $m$  и скорости  $v$  из-за того, что оно движется, имеет энергию  $E_k = mv^2/2$ .

## 2.4. ЭНЕРГИЯ ПОЛОЖЕНИЯ

Любое тело не одиноко в этом мире.\* Это значит, что любое тело как-то *расположено* по отношению к другим телам:

- выше или ниже относительно поверхности земли;
- если оно заряжено\*\* (как расчёска после проведения по волосам), то ближе или дальше от других заряженных тел;
- если оно намагничено — ближе или дальше от других магнитов;
- даже одни части тела относительно других частей этого же тела могут быть ближе (сжатая пружина) или дальше (растянутая пружина).

Во всех этих случаях мы имеем разные виды *энергии положения тела* (или его частей) относительно других тел.

Любая **энергия положения** имеет одно и то же общее имя — **потенциальная энергия**.

**Вопрос 19:** Как вы думаете, почему так её назвали — потенциальная?

**Ответ 19:** Потому, что эта энергия у тела есть, но пока она не обнаружилась, проявилась (в работе, в выделении тепла...). Чтобы сжатая пружина проявила свою (потенциальную!) энергию, надо дать пружине такую возможность (освободить и дать распрямиться).

**Вопрос 20:** Простите за дурацкий вопрос: гравитационная энергия — один из видов потенциальной энергии. А может ли в принципе гравитационная энергия быть кинетической?

**Ответ 20:** Ничего, что вопрос «дурацкий». Он предохранит Вас от «дурацких» ответов в будущем. Итак: потенциальная энергия бывает разной (по своей природе): упругой, гравитационной, электрической... А кинетическая — она единственная — в любой ситуации *это только энергия движения*, зависимость только от массы и скорости тела. Поэтому, например, если тело неподвижно, то его кинетическая энергия  $E_k = 0$  (так как скорость  $v = 0$ ). Но его гравитационная энергия вполне может быть ненулевой — скажем, в метре от него расположено второе тело. Ведь гравитационная энергия зависит от положения тела, а не от его *скорости*.

\* Имеется в виду именно физическое одиночество, а не духовное. Предмет физики, прежде всего, — природа, а не человек.

\*\* Т.е. имеет электрический заряд.

**Вопрос 21:** У сжатой пружины есть какая-то (потенциальная) энергия. А откуда берётся энергия у поднятого над землёй тела? Понятно, кто «подарил» телу эту потенциальную энергию — тот, кто поднял тело над землёй. Но почему начинает *меняться* энергия поднимаемого тела?

**Ответ 21:** Земля тянет к себе любое тело. Представьте себе, что между ними существует своеобразная «пружина». Тогда, поднимая тело, отводя его от Земли, мы как бы растягиваем эту пружину. А ведь растянутая пружина обладает потенциальной энергией, не так ли?

**Вопрос 22:** А почему «Земля тянет к себе любое тело»?

**Ответ 22:** Любое тело обладает массой  $m$ . *Только поэтому* оно тянет к себе любое другое тело (тоже, естественно, обладающее массой). Из всех окружающих нас тел Земля выделяется в этом смысле только величиной своей массы — в килограммах она выглядит особенно эффектно: 30 000 000 000 000 000 000 000 000 000 кг! Именно поэтому эффект **взаимодействия** вашего собственного тела с Землёй так заметен (не можете летать!), а вот взаимное притяжение вас и вашего соседа по парте (тоже существующее!) ни на что не влияет.

**Вопрос 23:** Кинетическая энергия тела спокойно может быть нулевой (если тело покоится). А может ли быть нулевой потенциальная энергия?

**Ответ 23:** Во-первых, где-то раньше у нас уже была такая ситуация (когда мы ломали расчёску). А во-вторых, попытаемся этого (мысленно) добиться. Для начала удалим все другие тела подальше от нашего — так, чтобы их взаимодействием можно было пренебречь. А затем сделаем само наше тело как можно более маленьким, чтобы можно было не учитывать любое (гравитационное, электрическое...) взаимодействие одних частей тела с другими (чтобы и на «части»-то его нельзя было разделить — такое вот маленькое тело\*\*). Тогда с чистой совестью можно будет написать про наше тело:  $E_n = 0$ .

На первый взгляд можно сказать, что  
**энергия тела = кинетическая энергия его движения + все виды его потенциальной энергии,**  
но это было бы неверно.

\* Существуют исключения из этого правила — фотоны. Это микрочастицы, из которых состоит свет. Впрочем, в последнее время появились сомнения в том, что масса фотонов равна нулю. Как видите, физика — вовсе не застывшая наука, которую можно просто узнать и «выучить». Она все время меняется. Можно лишь понять «правила игры» в неё.

\*\* Такой образ, такую **модель** тела называют **материальной точкой**.

## 3. ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

### 3.1. АТОМНАЯ ГИПОТЕЗА

Дело в том, что

**все тела состоят из огромного количества очень маленьких частиц — атомов.**

Это утверждение (иногда его называют *атомной гипотезой*) — самое содержательное из всех физических утверждений. В том смысле, что из него можно получить наибольшее число важных выводов, оно «работает» при объяснении громадного количества физических явлений. Если вы до сих пор не знали атомной гипотезы, то поздравляем — сегодня у вас большой день! Про существование атомов думали ещё древние греки в 4-ом веке до н.э., но впрямую, экспериментально, это удалось доказать лишь в начале XX века, спустя почти два с половиной тысячелетия.

**Вопрос 24:** Как вы думаете: как именно удалось доказать существование атомов?

**Ответ 24:** Представьте себе окно. Как определить, закрыто оно или открыто? Первая мысль — *рассмотреть* получше. Пусть окно так далеко от нас, что увидеть стекло не удаётся (в обычный микроскоп атомы невозможно увидеть). Идея: бросить в окно мяч и посмотреть, что будет. Примерно так поступил в 1908 году Эрнест Резерфорд. Он стал бомбардировать пленку из золотой фольги подходящими (по размеру, по энергии) «мячами» — частицами. Надо сказать, что потребовалось примерно 4 года «бросаний», чтобы сделать определённые выводы. Зато и помним мы (физики) эту работу до сих пор (она была оценена Нобелевской премией). Кстати, такой метод выяснения как что-то устроено — бомбардировка подходящими «снарядами» — очень популярен у физиков. Разумеется, для решения вопроса о том, одна комната в квартире или три, он не подходит.

**Вопрос 25:** Что такое «гипотеза»?

**Ответ 25:** Греческое слово, означает предположение, суждение, требующее проверки.

**Вопрос 26:** Какие основания были у древних греков предположить, что все окружающие их тела состоят из маленьких частиц?

**Ответ 26:** Попробуем поставить себя на место древних греков. Ну, например: положим ложку сахара в кружку с чаем (только ради физического эксперимента, пить не будем, говорят, что с сахаром — вредно). Размешаем. Куда исчез сахар? Растворился. Но что именно это значит? Совсем исчез? Но мы его чувствуем — по вкусу. Мы не утверждаем, что крупинки сахара и есть атомы, это не так. Мы просто фантазируем: каковы могли бы быть рассуждения людей, живших почти две с половиной тысячи лет назад. Вместо чая с сахаром можно было взять краску и опустить её в воду или (что ещё лучше) поставить (мысленно) чашу с благовониями в одном углу комнаты, а через некоторое время ощутить (тоже мысленно) их запах в другом углу.

**Вопрос 27:** Был ли в Греции в IV в. до н.э. чай? А сахар?

Или такая идея: всякое тело, даже твёрдое, если постараться, можно сжать. Значит: в нём есть какие-то промежутки. Между чем? Вот и возможная мысль про атомы вещества.\*

### 3.2. ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ

Микрочастицы, из которых состоят все тела,

- могут двигаться независимо от движения всего «большого» тела в целом (представьте, что вы двигаете закрытую коробку с тараканами);

- могут по-разному располагаться друг относительно друга, т. е. ближе или дальше от других микрочастиц данного тела.

Другими словами:

микрочастицы тоже могут иметь как кинетическую, так и потенциальную энергию (и тоже, как и большие тела, различных видов: гравитационную — ведь у них тоже есть масса, электрическую — они могут иметь электрический заряд и т. д.).

Поэтому существует энергия («большого») тела как целого — это энергия его движения (относительно других «больших» тел) и энергия его положения относительно других «больших» тел — его потенциальная энергия различных видов.

Одновременно с этой «внешней» энергией у того же самого тела есть энергия внутренняя — кинетическая (сумма кинетических энергий всех его микрочастиц) и потенциальная — энергия их взаимодействия между собой.

\* Если подумать, не такие уж они были гениальные, эти древние греки! Вот только, если *подумать*.



Итак:

**Энергия тела = Внешняя энергия + Внутренняя энергия**

Или с использованием обозначений **ext** и **int** (внешняя и внутренняя):

$$E = E_{\text{ext}} + E_{\text{int}} = (E_{\text{к}} + E_{\text{п}})_{\text{ext}} + (\Sigma(E_{\text{к}})^* + E_{\text{п}})_{\text{int}}$$

Иначе говоря,

внешняя (или, как её ещё называют, механическая) энергия — это энергия тела без учета энергии частиц, его составляющих.

**Вопрос 28:** Почему в выражении для внутренней энергии мы записали сумму кинетических энергий всех частиц и не написали сумму их потенциальных энергий, ограничившись общим обозначением  $E_{\text{п}}$ ?

**Ответ 28:** Просуммировав потенциальные энергии всех частиц, мы ошиблись бы ровно в два раза. Сначала мы учли бы, скажем, энергию взаимодействия частицы № 2 с частицей № 5, а когда дойдёт очередь учитывать энергию частицы № 5, мы бы приплюсовали энергию взаимодействия 5-ой частицы со второй. А ведь её мы уже учли один раз, когда учитывали № 2!

(Энергия ВЗАИМОдействия — это нечто ОБЩЕЕ для обоих тел. Если у вас с вашим другом общая комната в общежитии, то это не значит, что одна комната у вас и одна у него, — всего, стало быть, две комнаты.)

**Вопрос 29:** Оцените время, необходимое для того, чтобы записать (не используя значок  $\Sigma$ ) сумму энергий всех микрочастиц, составляющих ваш карандаш.

**Ответ 29:** Будем считать, что для записи энергии одной частицы нам требуется 1 секунда.

Пусть карандаш у нас лёгкий — 10 граммов. Нам неизвестно, сколько молекул дерева содержится в одном его грамме. Но можно предположить, что их больше, чем в воздухе.

Про воздух мы знаем, что... Поэтому...

*Терминология:*

«**большое**» тело = макроскопическое тело = **макротело**

частицы, составляющие макротело = **микрочастицы**

\* Мы написали короткое  $\Sigma(E_{\text{к}})$  вместо длинного  $E_{\text{к1}} + E_{\text{к2}} + E_{\text{к3}} + E_{\text{к4}} + E_{\text{к5}} + \dots$  и т. д. Представьте, сколько времени заняло бы упоминание в формуле всех микрочастиц нашего тела? Значок  $\Sigma$  (греческая буква *сигма*) — это просто обозначение суммирования тех слагаемых, общий вид которых указан после этого значка.

**Вопрос 30:** Где граница между макро- и микротелами ?

**Ответ 30:** С одной стороны, четкой границы между ними нет. Мы не можем сказать, что все тела с размерами меньше, скажем, 1 мм — это микро-, а больше — макро-. С другой стороны, ясно, что если каждое макротело состоит из громадного количества микротел, то их размеры должны сильно различаться. Действительно, эксперименты показывают, что типичный размер микрочастиц — примерно  $0,000000001 \text{ см} = 10^{-8} \text{ см}$ , а типичные размеры макротел много больше, ну, скажем, 1 см, или 1 м, или даже  $10^4 \text{ см}$ .\*

Заговорив о микрочастицах, мы столкнулись с ситуацией, где нам потребуются некоторые уточнения.

### 3.3. ВЕЩЕСТВО КАК РУССКАЯ МАТРЁШКА

Итак, все макротела состоят из микрочастиц. Из каких именно? Мы уже знаем, что их называют атомами. Все окружающие нас тела состоят из 92 видов атомов: атомы водорода, гелия, лития, ..., кислорода, ..., азота, ..., меди, ..., железа, ..., урана. Некоторые вещества состоят из атомов только одного сорта — в этом случае вещество так и называется — водород, азот, уран. Другие вещества составлены из атомов разных сортов. Вода — из атомов водорода и атомов кислорода, углекислый газ — из углерода и кислорода. Часто (но не всегда) бывает так, что несколько\*\* атомов объединяются — располагаются поближе друг к другу, взаимодействуют друг с другом заметно сильнее, чем с соседями. Такие группы атомов называют **молекулами**. Так вода состоит из молекул, в каждую из которых входят два атома водорода и один атом кислорода (обозначение:  $\text{H}_2\text{O}$ ). Углекислый газ состоит из молекул:  $\text{CO}_2$ , т. е. в каждой молекуле по одному атому углерода и по два кислорода. А вот чистый кислород бывает атомарный (состоит из одиночных атомов  $\text{O}$ ) и молекулярный (состоит из двухатомных молекул  $\text{O}_2$ ).\*\*

\* На всякий случай сделаем маленькое *математическое отступление про возведение в степень*. Напомним, что:  $a^2 = a \times a$ ,  $a^{-2} = 1/a^2$ ,  $(a^2)^3 = a^6$ ,  $a^2 \times a^3 = a^{2+3} = a^5$ .

\*\* Обычно число атомов, объединившихся в молекулу, действительно невелико — два, три, пять. Но бывают молекулы (правда, не в природе), состоящие из примерно 100 000 атомов каждая. Их размер (длина цепочки) примерно  $10^{-4} \text{ см}$ , это уже почти макротело.

\*\*\* Существует и вещество, состоящее из трёхатомных молекул  $\text{O}_3$ . Его запах вам хорошо знаком — это озон. В большом количестве он образуется в воздухе во время грозы.



Молекулы: вода, углекислый газ, кислород

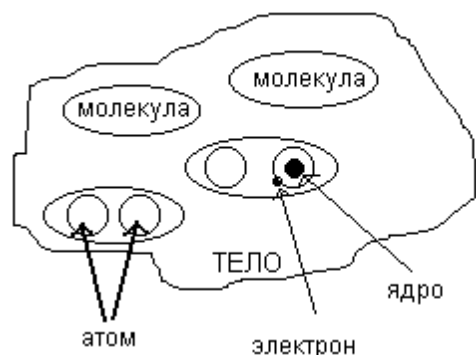
Итак, можно сказать, что **все вещества состоят из молекул, а молекулы — из атомов** (в отдельных случаях молекулы состоят из одного атома каждая, такие молекулы ничем не отличаются от атомов).

Атом, несмотря на его имя,\* тоже не прост. Каждый атом состоит из маленькой центральной части — **ядра** и окружающих его (как бы облаком) частиц — **электронов**. Напомним, что **размер атома примерно  $10^{-8}$  см** (у водорода поменьше, у урана почти в 10 раз больше). Размер ядра атома составляет примерно 1/100 000 от размеров атома.

**Вопрос 31:** Каков примерный размер ядра атома в см?

**Ответ 31:**  $10^{-8} \times 10^{-5} = 10^{-13}$  см.

Получается такая картина устройства вещества:



Макротело, состоящее из двухатомных молекул

Разумеется, молекул в теле примерно\*\* столько же, сколько и атомов, т. е. ужасно много. В 18 г воды примерно  $6 \times 10^{23}$  молекул!

\* По гречески — *неделимый*.

\*\* Слово примерно означает в физике не совсем то, что мы обычно так называем. Скажем, мы будем считать примерно равными числа  $6 \times 10^{23}$  и  $8 \times 10^{23}$ , хотя разница между ними — тоже не малое число. Просто их *отношение* порядка 1.

**Вопрос 32:** Чему равна разность между числами  $8 \times 10^{23}$  и  $6 \times 10^{23}$ ? (См. предыдущую сноску.)

**Ответ 32:**  $8 \times 10^{23} - 6 \times 10^{23} = (8 - 6) \times 10^{23} = 2 \times 10^{23}$

**Вопрос 33:** Как вы думаете: все ли молекулы куска льда одинаковы? А молекулы воздуха в комнате?

**Ответ 33:** Лёд — это «твёрдая» вода. Он состоит из одинаковых молекул  $H_2O$ . Только у льда они сильнее цепляются друг за друга, чем у воды. С воздухом другая ситуация. Он состоит из набора разных молекул — азота (в основном), кислорода, углекислого газа и др.

**Вопрос 34:** Во всяком атоме только одно ядро? А сколько электронов?

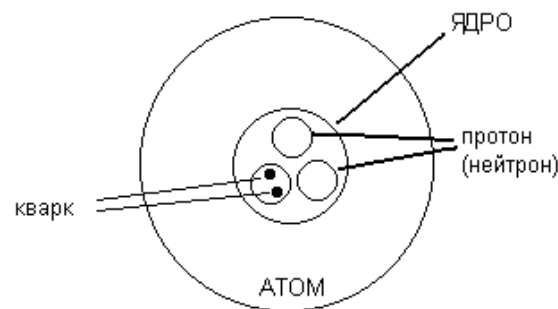
**Ответ 34:** Ядро в любом атоме одно, но сами ядра в разных атомах отличаются друг от друга (см. ниже). Число электронов в разных атомах разное: от одного у водорода до 92 у урана.

Такое впечатление, что вещество — это бесконечная матрёшка.

Действительно:

*ядро тоже состоит* из более мелких частиц (протоны и нейтроны), а те, в свою очередь, из ещё более элементарных — кварков. Но вот на кварках всё и заканчивается: они не состоят из чего-то «более элементарного». По крайней мере, так принято считать сегодня.\*

Теперь атом мы можем изобразить так (относительные размеры не соблюдены):



Мы рисуем **микрочастицы** в виде некоторых шариков или точек, но на самом деле они **совсем другие**.

\* Непонятно, что удивительнее: такая длинная вереница частиц в частице или то, что эта упаковка на чём-то заканчивается.

### 3.4. САМАЯ ВНУТРЕННЯЯ

У любой молекулы могут быть все те виды энергий, что и у макротела — кинетическая и все виды потенциальных — гравитационная, электрическая и т. д. У неё даже есть *своя внутренняя* энергия — это энергия атомов, её составляющих. Но ведь то же самое можно сказать и про атомы, не так ли? И про ядра атомов? Всё именно так и есть. Возьмём для примера простейший атом — атом водорода. У него всего два электрона вокруг ядра, а само ядро состоит всего из одной частицы — протона, правда сам протон составлен из трех частиц — кварков.

**Вопрос 35:** Сколько разных видов слагаемых будет в суммарной энергии атома водорода?

**Ответ 35:** Давайте считать: кинетическая энергия движения атома как целого — раз, потенциальная энергия взаимодействия атома с другими атомами (если он не один) — это два; кинетическая энергия ядра в целом (энергия «дрожания» протона) — три; кинетические энергии первого и второго электронов — это четыре; потенциальные (электрические) энергии взаимодействия первого и второго электронов с ядром — пять; потенциальная энергия взаимодействия электронов друг с другом — шесть, энергия взаимодействия внутриядерных («внутрипротонных») частиц (кварков) друг с другом — семь... Это только то, с чем мы успели познакомиться.

### 3.5. ЕСЛИ БЫТЬ ЧЕСТНЫМ...

...то придётся упомянуть о том, что у всякого тела (большого или маленького) есть энергия уже просто потому, что оно имеет какую-то массу  $m$ . (Но это не гравитационная энергия!) Такая энергия называется энергией покоя.\* Она очень велика, но и очень «трудно доставаема» — как правило, энергия покоя тела (частицы)

\* Энергия покоя чем-то похожа на долгосрочное вложение денег на счёт в банке. В принципе деньги можно заработать, но для этого нужно работать. Можно что-то продать, потом купить, а затем снова продать, но уже дороже. И получить прибыль — деньги. А можно ничего не делать — просто положить имеющиеся деньги на счёт в надёжном банке. Так и с энергией покоя — есть масса — имей энергию покоя. И чем больше масса, тем больше эта энергия. Только условия хранения энергии покоя природа установила очень жёсткие — как в сказке — в море кит, в ките яйцо, в яйце иголка, в иголке ключик от энергии покоя.

при любых его превращениях не меняется. Поэтому мы не будем её касаться почти до самого конца.

### 3.6. А ТЕПЕРЬ ПОДВЕДЁМ ИТОГИ...

- Кроме энергии тела как целого (кинетической и потенциальной), есть ещё и внутренняя энергия тела — энергия всех микрочастиц, его составляющих;
- из-за того, что все тела устроены подобно матрёшке, внутренняя энергия тела состоит из энергии молекул + внутренняя энергия этих молекул (это энергия их атомов) + внутренняя энергия этих атомов (это энергия ядер и электронов) + ...

Общая картина энергии тела выглядит устрашающе сложной. Но это лишь на первый взгляд. Как часто бывает в физике, не все детали этой картины одинаково существенны для объяснения конкретных физических явлений. *Обычно не все энергии одновременно заметно меняются. А ведь нам важны не сами по себе величины энергий, а как раз их изменения!* Поэтому в конкретной ситуации обычно можно ограничиться учётом немногих видов энергии.

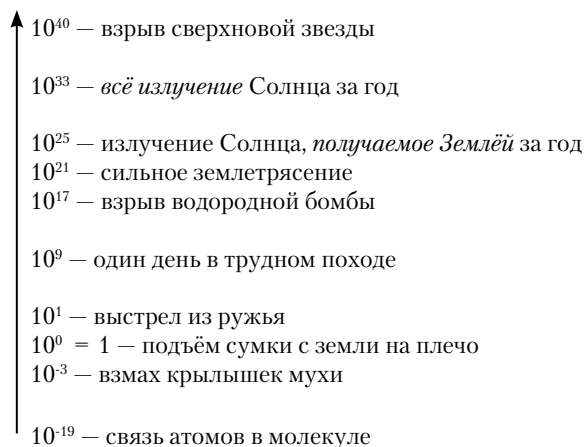
## 4. МАСШТАБ ЭНЕРГИЙ

Мы уже упоминали такую единицу измерения энергии, как 1 Джоуль.\*

**Вопрос 36:** Как вы думаете, как именно можно было бы определить,\*\* что такое 1 Дж?

**Ответ 36:** Например: энергию, необходимую для того, чтобы вскипятить 100 г воды,\*\* принимаем (по всеобщей договорённости!) за 1 Дж. Или: выберем некоторую пружину, будем считать её всеобщим образцом (эталоном) и бережно хранить. Договоримся считать 1 Джоулем такую энергию, которая позволяет сжать эту эталонную пружину, например, на 1 см. Или ещё проще: примем за 1 Дж энергию, позволяющую тело массой 1 кг поднять на 1 м над землёй.\*\*\*\*

Итак, пока не важно, что такое 1 Джоуль на самом деле — просто какая-то единица энергии. Мы предлагаем вам взглянуть на шкалу **соотношений** между разными энергиями (в джоулях):



\* Если единица измерения названа в честь какого-то человека, то принято писать её с заглавной буквы. Роберт Джоуль жил и работал в Англии в середине прошлого века. Исследовал превращения энергии в тепловых процессах. Его знаменитые опыты привели к открытию закона сохранения энергии.

\*\* Определить — в смысле дать чёткое определение.

\*\*\* При определённом давлении воздуха и определённой начальной температуре воды.

\*\*\*\* На самом деле для такого подъёма нужно примерно 10 Дж.

**Вопрос 37:** Энергия связи атомов в молекуле так мала! Почему же металл такой прочный?

**Ответ 37:** То, что кажется игрушкой великану, может быть горой для лилипута.\* В каждом кубическом сантиметре металла (кубик со стороной 1 см) находится примерно 10<sup>25</sup>—10<sup>26</sup> атомов. Можно прикинуть, на каких расстояниях они в среднем находятся друг от друга.

**Вопрос 38:** Прикиньте — на каких?

**Ответ 38:** Если в кубике со стороной 1 см и, следовательно, с объёмом  $V = 1 \times 1 \times 1 = 1 \text{ см}^3$  находится  $n = 10^{25}$  штук атомов, то на один атом приходится объём  $1 \text{ см}^3 / (10^{25}) = 10^{-25} \text{ см}^3$ . Т.е. каждый атом находится как бы в маленьком кубике с объёмом  $v = 10^{-25} \text{ см}^3$ . Ребро этого кубика будет иметь длину  $a$  такую, что  $a^3 = v$ , т.е.  $a^3 = 10^{-25}$ . Поэтому  $a = \sqrt[3]{10^{-25}} \approx (1/2) \times 10^{-8} = 5 \times 10^{-9} \text{ см}$ .\*\* Значит, именно на расстоянии  $5 \times 10^{-9} \text{ см}$  друг от друга (в среднем) и будут находиться атомы в металле. Примерно такой размер имеет самый маленький из атомов — атом водорода.

На таких малых расстояниях 10<sup>-19</sup> Дж — очень даже не маленькая энергия. (Известный физический эффект — чем ближе к печке, тем теплее.)

Можно сказать и иначе: а ведь суммарная энергия всех частиц из 1 см<sup>3</sup> будет порядка  $10^{25} \times 10^{-19} = 10^6$  Дж, т.е. **миллион** джоулей!

**Вопрос 39:** Когда примерно был написан «Гулливер»?

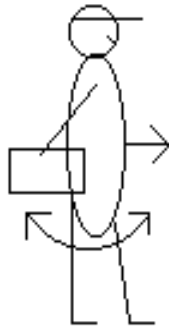
\* См. «Путешествия Гулливера» Джонатана Свифта.

\*\* Очередное математическое отступление (для тех, кто в нём нуждается): **про извлечение корней**. Напоминаем, что  $\sqrt{a} = a^{1/2}$ ,  $\sqrt[3]{a} = a^{1/3}$ . Например:  $\sqrt{16} = 4$ ,  $\sqrt[3]{8} = 2$ .

## 5. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ — НЕОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ПОДРОБНОСТИ

### 5.1. ЧЕЛОВЕК С ПОРТФЕЛЕМ

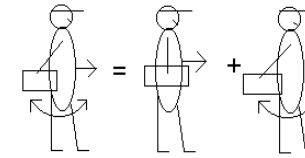
Вот человек массы  $M$  идёт со скоростью  $V$ . А вот его кинетическая энергия:  $E_k = MV^2/2$ . А теперь человек взял в руки портфель и стал помахивать портфелем на ходу. Глядя на рисунок, можно задать вполне дурацкий вопрос: какова кинетическая энергия портфеля?



Попробуем разобраться. Что общего у *движения* портфеля с простым случаем движения человека? То, что он тоже движется вперёд (или назад) вместе с человеком. Что непохожего? Качание на ходу. Мораль: ваш портфель *одновременно* участвует в двух разных движениях — «вместе с человеком» и «туда-сюда» (относительно человека).

А тогда — догадка: если эти два движения *не влияют друг на друга*, т. е. каждое из них происходит так, как если бы другого не было, не замечая друг друга, независимо, то

*сложное движение можно изобразить в виде суммы простых движений:*



качающийся портфель в руке идушего человека	=	неподвижный портфель в руке идушего человека	+	качающийся портфель в руке стоящего человека
--	---	---	---	---

Предположим, что наша *догадка* верна (а она на самом деле верная — так говорит наш главный судья — эксперимент, опыт\*). Тогда, наверно, можно просто записать:

$E_k(\text{порт}) = E_k(\text{вместе с чел, без кач}) + E_k(\text{качания относ. чел}) ???$

На первый взгляд это кажется вполне разумным (можете проверить на своих домашних — провести опрос). Но: если бы в физике *истину* можно было определять *мнением большинства*, то... мы бы в этом случае ошиблись! И вот почему.

Представьте мысленно, что вы складываете два независимых движения. Что именно вы делаете при этом? Если подумать, то вам нужно взять «след» от одного движения и наложить на него «след» от второго движения. А потом как-то (неважно как) сложить их. Т.е. вам придется складывать какие-то перемещения тела (портфеля). Но (внимание!) ведь *скорость* движения — это расстояние (перемещение), пройденное за одну секунду, разумеется, с учётом направления. Значит, складывая независимые движения, мы можем складывать скорости этих движений:

$V(\text{портфеля}) = V(\text{чел}) + V(\text{качания})$  — с учётом их направлений!

Итак, *независимость движений* позволяет нам складывать скорости тела в этих движениях. Но ведь если мы решим складывать кинетические энергии, то нам придется складывать не просто скорости, а *квадраты* скоростей:  $mu^2/2 = mV^2/2 + mv^2/2$  или, сокращая на  $m/2$ ,  $u^2 = V^2 + v^2$ , где  $u, V$  и  $v$  — полная скорость портфеля, скорость человека и скорость качания портфеля соответственно. Легко сообразить, что если, например,  $1 + 2 = 3$ , то  $1^2 + 2^2 = 5$ , а вовсе не  $3^2 = 9$ \*\*.

\* Например, какой?

\*\* Это очевидно для знающих формулу квадрата суммы: если  $a + b = c$ , то  $c^2 = (a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$ .

**Вопрос 40:** А есть такая пара чисел, для которой всё-таки выполняется равенство квадратов: если  $a + v = c$ , то и  $a^2 + v^2 = c^2$ ?

**Ответ 40:** Подсказка — см. предыдущую сноску.

Как же быть с кинетической энергией портфеля в вашей руке? А так и быть: сначала найти полную скорость портфеля, а потом уже возвести её в квадрат и домножить на половину массы портфеля. Легко сказать, но ведь с *кинетической энергией качания* всё далеко не так просто, как с человеком: скорость всё время меняется по величине (в крайних положениях, например, вообще замирает, а когда подвес вертикален, скорость, похоже, максимальна\*), и периодически меняется направление движения... А вы на минуту представьте себе, что качание портфеля не плоское (вдоль движения человека), и всё это нужно как-то учесть при подсчёте скорости качания, а потом при сложении со скоростью машины (с учётом направлений этих скоростей!), и, боюсь, тогда мало вам не покажется.

Но, во-первых, не всё сразу, а во-вторых, попробуем навести некоторый порядок во всех этих движениях. Для начала представимся.

## 5.2. ИМЕНА

Назовём некоторые вещи своими именами.

Такое движение, как перемещение человека, называется **поступательным**. В этом случае скорость всех точек тела *в любой момент времени* одна и та же (и по величине, и по направлению).\*\* Естественно, что для такого движения  $E_k = mv^2/2$ .

Почему «естественно»? Во-первых, мы уже упоминали, что «в простейшем случае  $E_k = mv^2/2$ . Трудно себе представить более простое движение тела, чем поступательное, не правда ли? Во-вторых, *если бы* не все точки тела имели одну и ту же скорость, то какую именно скорость  $v$  мы должны были бы подставить в выражение для  $E_k$ ? Непонятно. Но, слава Богу, для поступательного движения такой вопрос не стоит.

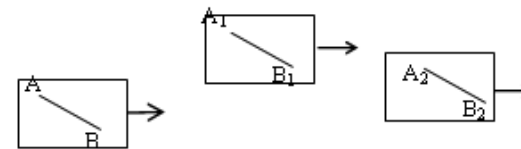
**Вопрос 41:** Можно дать и другое *определение* поступательному движению. Выберем две любые точки нашего тела и проведём через них прямую

\* Потом проверим!

\*\* По крайней мере, мы можем так считать.

линию. Тогда: поступательное движение — это такое, при котором... Закончите эту фразу.

**Ответ 41:** ...при котором эта прямая перемещается всё время параллельно самой себе.

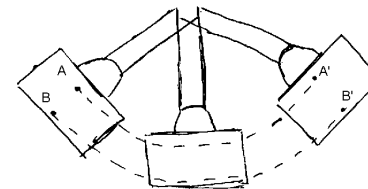


Поступательное движение тела:  
отрезок АВ параллелен отрезку  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$  и т. д.

Качание портфеля, как и любое повторяющееся движение (туда-сюда) — пример **колебательного** движения. Чем же колебательное движение отличается от поступательного, кроме того, что оно может происходить с другой скоростью (по величине, по направлению)? Главное отличие — повторяемость движений — периодически тело повторяет своё положение (в данном случае — относительно машины). Известные примеры: движение качелей, маятника, сжатой и отпущенной пружины. Повторяемость колебаний даёт возможность предсказать некоторые особые свойства такого движения. О них мы поговорим в другой раз.

**Вопрос 42:** А разве движение портфеля относительно тела человека («качание») нельзя считать *поступательным*?

**Ответ 42:** Строго говоря, нет. Если (мысленно) приглядеться, то портфель подобен маятнику: его более далёкие точки от места прикрепления (плеча) проходят за то же время более длинный путь, чем более близкие точки:



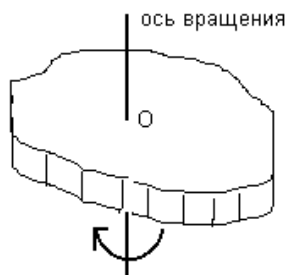
Дуга  $AA'$  короче дуги  $BB'$ . Поэтому скорость точки А меньше скорости точки В.

Но: это «*строго говоря*», а если портфель качается не очень сильно (с небольшим размахом) и если он не очень большой, то можно считать, что скорость всех его точек в любой момент времени одна и та же. А это и есть условие поступательного движения.

**Колесо автомобиля** даёт нам ещё один пример сложного движения — оно поступательное (вместе со всем автомобилем) и одновременно вращательное (вокруг собственной оси).

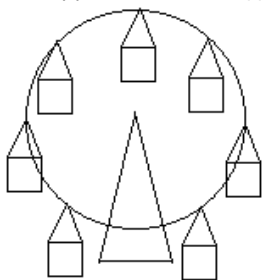
**Вопрос 43:** Поступательное движение — такое, при котором все точки тела имеют в любой момент времени одну и ту же скорость (по величине и по направлению). А какое движение можно назвать *вращательным*?

**Ответ 44:** Такое, при котором *все точки тела движутся по окружностям, а центры этих окружностей лежат на одной и той же прямой* — оси вращения тела.

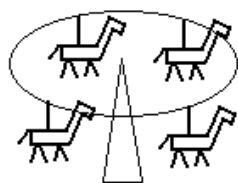


Вращательное движение тела

**Вопрос 44:** Можно ли считать *поступательным* движение кабинок «колеса обозрения»? Движение лошадок на карусели?



Колесо обозрения



Карусель

**Ответ 44:** Кабинок — можно, лошадок — нет.

**Вопрос 45:** Есть подозрение, что качание портфеля тоже можно считать *вращательным* движением относительно оси (мысленной!), проходящей через точку его закрепления (плеча). Так ли это? А если так, то *вращательное* это движение или всё-таки *колебательное* (или может быть *поступательное*)?

**Ответ 45:** Действительно, качание портфеля можно считать вращательным движением, а можно и колебательным. Бывают случаи, когда можно

*по-разному* называть одно и то же движение. (Вас ведь тоже, скорее всего, по-разному величают родители, друзья, учитель и продавщица в магазине.) Важно другое: если мы при подсчёте энергии уже учли *вращение* портфеля, то добавлять туда его *колебательную* энергию уже не нужно.

### 5.3. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ $E_k(\text{rot})^*$

Основная сложность при подсчёте энергии вращающегося тела — это...

**Вопрос 46:** Что?

Поэтому совершенно неясно, какую из скоростей надо подставлять в выражение для кинетической энергии  $MV^2/2$ .

Как обойти эту сложность? Нет ли в колесе точек, обладающих одинаковой скоростью? Конечно, есть: все точки, лежащие на одинаковом расстоянии от оси вращения, вращаются с одной и той же скоростью.

**Вопрос 47:** Придумайте колесо такой конструкции, чтобы для подсчёта энергии колеса этой сложности (различие в скоростях вращения для разных точек) практически не существовало.

**Ответ 47:** Это колесо, у которого практически все его точки находятся на одном и том же расстоянии от оси вращения. То есть это колесо, состоящее из очень тонкого тяжелого обода, скреплённого с осью очень тонкими (лёгкими) спицами. Для такого колеса очень просто сосчитать его кинетическую энергию: это будет просто  $mu^2/2$ , где  $m$  — масса колеса (практически она совпадает с массой обода), а  $u$  — скорость вращения колеса вокруг своей оси.\*\*

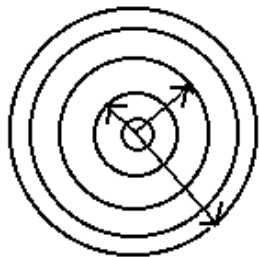
Итак, для *специального* вида колеса (такие тоже бывают) мы легко можем решить задачу — найти его  $E_k(\text{rot})$ . Нельзя ли применить наш способ решения к сплошному колесу (диску)? Возможно ли увидеть в диске *ободы*? Конечно, ведь диск — это

\* Иногда, для разнообразия и чтобы не забыть английский — язык международного общения, абсолютно необходимый физикам, мы будем пользоваться другими сокращениями: вместо *полный* — **total**, вместо *вращ* — **rot** (rotation), вместо *кол* — **vib** (vibration).

\*\* Если поподробнее, то нужно весь обод мысленно разбить на одинаковые кусочки и каждый из них будет иметь одну и ту же массу  $\Delta m$ , один и тот же квадрат скорости  $u^2$ , а следовательно, энергия вращения *всего обода* будет суммой энергий *всех его частей*:

$$E_k = \Delta m u^2 / 2 + \Delta m u^2 / 2 + \Delta m u^2 / 2 + \dots = (\Delta m + \Delta m + \Delta m + \dots) u^2 / 2 = m u^2 / 2.$$

просто набор ободов разного радиуса, от почти нулевого до обода с радиусом, равным радиусу колеса.



Диск как сумма разных ободов

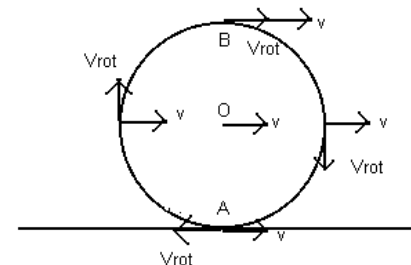
Разумеется, у всех этих ободов будет разная масса, у всех — своя скорость (у соседних ободов она будет очень близкой). Но: рецепт вычисления энергии любого обода будет один и тот же. Скорость вращения можно будет связать с радиусом обода. Именно поэтому станет возможным определить энергию вращения диска — как сумму энергий всех ободов. Причём, она будет зависеть только от массы *всего* обода и от времени, которое это колесо тратит на один свой оборот (как говорят, от *угловой скорости* колеса).

**Вопрос 48:** Мы хотим поточнее сосчитать  $E_k$  дискового колеса через сумму энергий ободов. На какое число ободов имеет смысл разбить диск?

**Ответ 48:** Чем больше, тем лучше — точнее будет наш ответ. С другой стороны, для ответа с требуемой точностью может хватить, например, четырех ободов. Добавлять пятый будет уже бессмысленно. (На вопрос своей бабушки «Который час?» не стоит отвечать «10 часов 17 минут 48 секунд». Достаточно сказать «Четверть одиннадцатого» — иначе она подумает, что вы нездоровы.)

**Вопрос 49:** Представьте себе колесо-обод, катящееся по дороге со скоростью  $V$ . Уточним, что  $V$  — это скорость перемещения центра колеса, его осевой точки. С какой скоростью колесо будет вращаться вокруг своей оси?

**Ответ 49:** См. рис. на следующей странице.



Самая нижняя точка колеса А (та, что касается дороги) в любой момент имеет ту же скорость, что и дорога, т. е. нулевую скорость относительно дороги (если, конечно, нет *проскальзывания*). Но, как всякая точка колеса, она участвует одновременно в двух движениях — *поступательном* со скоростью  $V$  и во *вращательном* со скоростью  $V(\text{rot})$ . Нетрудно видеть, что  $V$  и  $V(\text{rot})$  точки А *противонаправлены*. Поэтому для неё  $V - V(\text{rot}) = 0$ , то есть  $V(\text{rot}) = V$ . Но точно такая же скорость вращения будет и у всех других точек обода. Поэтому получается, что если только нет проскальзывания, то *вращение колеса вокруг своей оси происходит со скоростью поступательного движения колеса*.

**Вопрос 50:** С какой скоростью движется (относительно земли) самая верхняя точка колеса (см. рис. 10 предыдущего вопроса)?

**Ответ 50:**  $V_B = 2V$ .

## 5.4. ПРОБЛЕМА ВЫБОРА

Хорошо было считать кинетическую энергию, пока мы не знали всего разнообразия движений — умножай себе массу тела на квадрат его скорости, дели пополам — и все дела.

(Во многом знании много печали, — сказал кто-то из древних.)

**Вопрос 51: Кстати, кто?**

Так *всё-таки*: кинетическая энергия автомобиля — это  $MV^2/2$  (где  $M$  — его масса,  $V$  — скорость корпуса машины) или сюда нужно добавить энергию вращения колес? Ответ: всё зависит от задачи, которую вы решаете. Если речь идёт о расстоянии, которое сможет проехать машина при полной заправке бака, то энергия колес вас не должна интересовать. В решении будет фигурировать именно  $MV^2/2$ . А если вы анализируете возможный эффект



столкновения случайного прохожего со случайно оторвавшимся от машины колесом, то нужно будет учитывать именно энергию колеса (и его движения как целого, и его вращения вокруг собственной оси). В первом случае мы игнорируем детали движения колёс, как если бы мы видели автомобиль с большого расстояния. А во втором — мы как бы подходим поближе и при этом фактически не видим ничего, кроме колеса.

## 5.5. МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА — МОДЕЛЬ СЕЗОНА

**Вопрос 52:** Верно ли утверждение: размеры тела (при одной и той же массе) не влияют на его кинетическую энергию?

**Ответ 52:** Если тело движется поступательно, то верно: если бы у нас был не настоящий автомобиль, а игрушечный, но той же массы  $M$ , то его кинетическая энергия поступательного движения никак не отличалась бы от энергии настоящего автомобиля —  $MV^2/2$ . А если тело вращается или движется колебательно, то ответ будет *нет*. Причём понятно, что чем больше размеры тела, тем заметней его вращение.

*Поэтому: если размеры движущегося тела очень малы, то можно считать, что оно движется чисто поступательно, а его кинетическая энергия равна  $E_k = MV^2/2$ .*

**Вопрос 53:** Что значит «размеры тела малы»?

**Ответ 53:** Малы по сравнению с любыми другими размерами, которые есть в данной ситуации, в данной задаче. Пример: размеры автомобиля малы в задаче о времени поездки из Нью-Йорка в Бостон, но совсем не малы в задаче о времени путешествия жука по поверхности машины от багажника до переднего бампера.

Такое *представление*, такая **МОДЕЛЬ** *реального* тела называется **материальной точкой**. Понятно, что бессмысленно говорить о вращении точки вокруг своей оси. Точка может двигаться только поступательно.\* В большинстве наших задач такая простейшая модель — представление тела в виде материальной точки — будет вполне уместно и достаточно.

Ещё раз:  $E_k(\text{мат.точка}) = E_k(\text{поступ.}) = MV^2/2$

**Заметим, что** большинство затруднений в этом параграфе мы

\* Или в крайнем случае колебательно.

пытались разрешить с помощью одного и того же приёма — свести новую для нас ситуацию (колебания, вращения) хотя бы отчасти к старой или к набору старых, уже решённых. Наверно, это один из самых распространённых подходов к решению задач не только в физике. Жизнь задаёт нам вопрос, а мы роёмся в памяти — не было ли в нашей практике хотя бы отчасти похожих ситуаций...

Подведём неутешительные итоги. В этом параграфе нашим глазам предстала не слишком симпатичная картина: достаточно чуть пристальнее всмотреться в реальное движение тел, как выясняется, что простой рецепт подсчёта их кинетической энергии никуда не годится. Потому что на простое и чёткое поступательное движение накладываются разные колебания и (или) вращения. И ещё спасибо природе, что обычно эти движения не влияют друг на друга, поэтому их скорости можно складывать (с учётом направлений). Но, оказывается, что нельзя взять и просто сложить энергии разных движений.\* Хуже того, ни в одном из рассмотренных нами случаев (качание портфеля, качение колеса) мы так и не получили выражения для соответствующей кинетической энергии. Мы лишь обнажили большие (трудные) места и слегка наметили возможные пути решения. Единственная отрада — ситуация, **когда наше тело позволительно считать математической точкой. Тогда всё сводится только к поступательному движению тела, а его кинетическая энергия — это просто  $MV^2/2$ .** В заключение приведём строчки одного умника, безуспешно пытавшегося изложить этот курс в стихотворной форме: «Каждый школьник будет рад поделить  $MV^2$ , потому что это всё же хоть какой-то результат».

\* На самом деле иногда, в некоторых специальных случаях, так можно будет делать.

ют АБСОЛЮТНЫМИ. Они не требуют какого-то уточнения. («У меня в кармане две монетки».)

## 6. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ — ПОДРОБНОСТИ НЕ ДЛЯ ВСЕХ

### 6.1. СЧАСТЛИВЫ ЛИ ВЫ?

Дурацкий вопрос! Где: дома или на работе? Когда: сейчас или вообще? По сравнению с кем? Не исключено, что в ответ вы философски заметите: всё в жизни относительно. И будете, наверно, правы.

Если шестилетний малыш спросит: Ты знаешь, как устроен автомобиль? — то вы, скорее всего, ответите: Да, знаю. И это правда. ( В автомобиле есть бензин, он поступает в мотор, мотор «съедает» бензин и заставляет колеса крутиться. Руль управляет колёсами — велит им ехать куда надо. Ещё есть тормоз. Всё.\*) Если тот же вопрос задаст инженер заводов Форда, то вы ответите: Чуть-чуть знаю. И это тоже правда. ЗНАЧИТ: уровень ваших знаний об автомобиле ОТНОСИТЕЛЕН. Он зависит от выбора собеседника.

Итак, бывают утверждения (*я счастлив, я знаю автомобиль*), которые мы называем **относительными**. Содержащаяся в них информация недостаточна для определённых выводов. ( Если я отвечу «Да, счастлив», — это вам что-то скажет?) Такие утверждения зависят от конкретной ситуации. Иногда молча имеют в виду наиболее стандартную ситуацию (я знаю автомобиль настолько, что могу определить, что именно неисправно). Если же эта ситуация, это условие (кто? где? когда? относительно чего?) нам неизвестно, то и само утверждение имеет не очень много смысла.

Но всё ли в жизни относительно? Вот пример: «Я чищу зубы каждое утро». Если только вы говорите правду (это отдельный вопрос), то уж что-нибудь одно: или каждое или не каждое. В конце концов, вы в принципе можете проверить это утверждение. А попробуйте проверить «степень счастливости»! Вроде бы проверить уровень знаний автомобиля можно, но не забудьте, что многое зависит от того, кто именно будет проводить проверку (малыш, инженер).

Итак, есть и более определённые утверждения. Их называ-

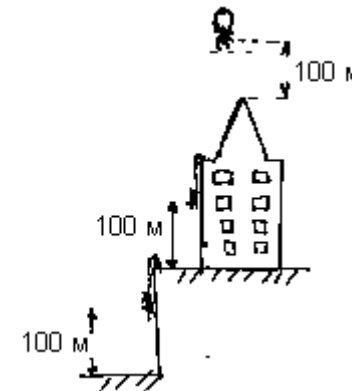
**Вопрос 54:** Утверждение «Я живу на первом этаже» — абсолютное или относительное?

**Ответ 54:** Относительное, оно зависит от того, в какой стране вы живёте, потому что в США принято понятие ground floor, а первым будет следующий этаж. А в России или в Испании это будут соответственно первый и второй этажи. Т.е. там американский первый этаж будет называться вторым.

### 6.2. ВЫСОТА

Абсолютными и относительными могут быть не только утверждения, но и понятия.

Возьмём ситуацию поближе к физике. «Нахожусь на высоте 100 м.» На какой высоте находится автор сообщения? Скорее всего — на высоте 100 м над землёй. А если он спускается в глубокую подземную пещеру, то может это означать, что ему осталось 100 м до дна пропасти? Может. А если он стартовал на воздушном шаре с крыши небоскрёба, то может быть это 100 м выше крыши? Всё может быть. Что же абсолютно (верно во всех случаях)? То, что автор находится на 100 м выше высоты, которую он ПРИНЯЛ за нулевую. Итак, понятие «высоты» относительно. Оно требует указания — от какого уровня отсчитывается эта высота. А что абсолютно? РАЗНИЦА двух высот — принятой за нулевую (дно, земля, крыша) и положения человека. Разница высот во всех случаях равна 100 м.



Понятие «высота» относительно, а «изменение высоты» — абсолютно

\* Похоже, мы забыли регулятор скорости. Интересно, как он работает...

### 6.3. ПРО ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ

*Вспомним:* есть такой вид потенциальной энергии  $E_g$ , который связан с высотой тела над поверхностью земли, — гравитационная потенциальная энергия. Чем выше тело, тем больше у него способность что-то деформировать, разрушать, нагревать и т. д., тем больше его потенциальная энергия. Но получается, что если значение *высоты* относительно (зависит от выбора нулевого уровня), а сама потенциальная энергия зависит от высоты, то и величина  $E_n$  относительна?

Вроде бы так. Разберёмся, что же это означает. Выходит, что сообщение « $E_n = 100$  Дж» ещё мало о чём говорит, — необходимо указать, какое положение тела (относительно земли) мы ПРИНЯЛИ за нулевое, т. е. за положение с  $E_n = 0$ .

Если подумать, то это (относительность значения  $E_n$ ) довольно странно. Ведь иметь энергию именно 100 Дж — это значит иметь *возможность* совершить что-то (работу) именно на сотню Дж! Как же эта *возможность* может зависеть от выбора уровня отсчёта?

Чтобы продвинуться в понимании ситуации, придётся сделать...

### 6.4. ВАЖНОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ: ПРО ТЕЛО НАД ЗЕМЛЁЙ

Попробуем *сообразить*, каким должно быть выражение для потенциальной энергии тела, поднятого над землёй.

Прежде всего — от чего, от каких величин может зависеть интересующая нас  $E_n$ ? Ну, во-первых, от высоты тела  $h$  над землёй. Во-вторых, от массы поднятого тела  $m$ . Фактически это следует из опыта — кирпич, упавший с 10 м, энергичнее упавшего с 1 м. А кирпич массой 5 кг опаснее двухкилограммового. Впрочем, масса 2 кг может быть и работоспособнее, чем 5 кг.

**Вопрос 55:** Когда ?

**Ответ 55:** Когда 2 кг находятся существенно выше, чем 5 кг.

Поэтому можно даже *предположить*, что  $E_n$  пропорциональна *произведению*  $m$  и  $h$ :

$$E_{np} \sim mh,$$

т. е. если произведение массы тела на его высоту над землёй увеличится (или уменьшится) в 3 раза, то и  $E_n$  тела увеличится (или уменьшится) тоже в три раза.

**Вопрос 56:** А откуда мы знаем, что  $E_n \sim mh$ , а не  $E_n \sim m^2h$  или  $E_n \sim mh^2$ ?

**Ответ 56:** Во-первых, не может быть зависимости  $E_n \sim h^2$ , так как это означало бы, что тело будет иметь одинаковую потенциальную энергию и на высоте  $+h$  НАД землёй, и на высоте  $(-h)$ , т. е. на *глубине*  $h$  ПОД ней. Ведь  $h^2 = (-h)^2$ . Поэтому вариант  $E_{np} \sim mh^2$  отпадает.

**Вопрос 57:** А почему не могут быть равны потенциальные энергии тела на высоте  $h$  и на глубине  $h$ ?

**Ответ 57:** Потому что во втором случае *закопанное* тело будет ближе к Земле (лучше сказать — *к её центру*), чем в первом случае. А ведь потенциальная энергия — это энергия положения.

**Ответ 56** (окончание). Зависимость вида  $E_n \sim m^2h$ , строго говоря, мы не можем исключить. Но это означало бы, что зависимость энергии от  $m$  **сильнее**, чем зависимость от  $h$ : при возрастании  $m$  в 2 раза  $E_n$  должна увеличиться в 4 раза, а при таком же росте  $h$  — только в 2 раза. Пороемся в памяти: разве эффект действия падающего кирпича *гораздо больше* зависит от его массы, чем от высоты падения? Трудно сказать... Скорее  $m$  и  $h$  в этом смысле должны быть равноправны. Мы понимаем, что память может нас и подвести,\* и это не самый сильный довод в пользу зависимости  $E_n \sim mh$ . В конечном итоге критерий правильности того или иного предположения у нас один — опыт, эксперимент. Но до поры до времени нам придётся оставаться в рамках наших нестрогих предположений.

*И это типично для физики.\*\**

Итак, будем считать, что  $E_{np} \sim mh$ .

От чего ещё может зависеть эта энергия? Мы забыли про Землю: ведь чем сильнее она тянет к себе тело  $m$ , тем, видимо, будет больше его  $E_{np}$ . Не вдаваясь (пока!) в детали — чем определяется влияние Земли (ее масса, радиус, плотность..., их комбинации?) — просто обозначим соответствующую величину в  $E_n$  через  $g$  (от *gravitacia*). Тогда:

$$E_{np} = gmh$$

\* Тем более под действием кирпича.

\*\* Автор хорошо помнит свою ученицу Соню Н., которая, выслушав на уроке разбор решения задачи, любила заметить: я всегда подозревала, что физика — это сплошное жульничество.

Заметим, что  $g$  — величина постоянная (ведь все параметры Земли постоянны) в отличие от  $m$  и  $h$ , которые могут меняться. Между прочим, постоянство  $g$  можно было предвидеть: если только  $E_{\text{п}} \sim mh$ , то  $g$  обязательно должен быть постоянной величиной.

Мы заканчиваем наше важное отступление.

Вот его **ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ** — потенциальную энергию тела, поднятого над землёй, можно вычислить по формуле:  
 $E_{\text{п}} = mgh$ ,

где  $m$  — масса тела,  $h$  — его высота над поверхностью земли, а  $g$  — постоянная, связанная с параметрами Земли (позже мы её уточним), важно только, что для Земли — это постоянная величина, а скажем для Луны — это было бы другое число.

**Вопрос 58:** Какова потенциальная энергия тела массы  $m$ , закопанного в землю на глубину  $h$ ?

**Ответ 58:**  $E_{\text{п}} = -mgh$ .

**Вопрос 59:** А разве  $g$  для закопанного тела будет той же величиной, что и для тела на поверхности земли?

Мы видим, что одна и та же потенциальная энергия может быть у «тел» в совершенно разных ситуациях. И наоборот: в одной и той же ситуации энергия тела может быть разной в зависимости от выбора её нулевого уровня.

Но вернёмся к вопросу, который мы задали выше: разве, скажем, 300 Дж — это не величина вполне определённой работы, определённого сжатия пружины, нагрева газа? Да, конечно, имея 300 Дж, вы сожмёте конкретную пружину на вполне определённое число сантиметров (позднее мы вернёмся к этой задаче). Но дело в том, что это не просто энергия, а ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ энергия. В отличие от кинетической — это энергия, которая как бы запасена у тела, она возможна, но не обязательно проявится. Пока тело не меняет своё положение относительно других тел, его потенциальная энергия никак не проявляется. (Чтобы обнаружить  $E_{\text{п}}$  камня, лежащего на полке, нужно, чтобы он начал падать.) Именно поэтому сообщение, что у камня есть 300 Дж потенциальной энергии, означает только то, что если ему (камню) дать возможность реализовать свою  $E_{\text{п}}$  (возможность падать), то, достигнув положения, где  $E_{\text{п}}$  принята за 0, камень «выдаст» ровно 300 Дж. В каком виде? Падающий камень часть энергии «переведёт» в свою кинетическую энергию,

часть — в тепло (сам нагреется и нагреет воздух в зоне падения). В общем, это зависит от конкретной ситуации. В любом случае энергия никуда не пропадает, работает закон её сохранения.

Возвращаясь к случаям, изображённым на рисунке, можно сказать, что при падении «воздушника» до уровня земли, он «выдаст»  $4 \times 10^5$  Дж, а при падении до дна пропасти —  $7 \times 10^5$  Дж. Или, другими словами, он имеет  $E_{\text{п}} = 4 \times 10^5$  Дж относительно уровня 300 м выше поверхности земли и  $E_{\text{п}} = 7 \times 10^5$  Дж относительно дна пропасти. Что неизменно? Сосчитаем разницу потенциальных энергий спелеолога в двух положениях — в 100 м над дном и на дне:

$$\Delta E_{\text{п}} = E_{\text{п}}(100 \text{ м}) - E_{\text{п}}(\text{дно}).$$

Если принять  $E_{\text{п}}(\text{дно}) = 0$ , то  $\Delta E_{\text{п}} = 100 \times 10 \times 100 - 0 = 10^5$  Дж, а если принять  $E_{\text{п}}(\text{земля}) = 0$ , то  $\Delta E_{\text{п}} = 100 \times 10 \times (-200) - (-100 \times 10 \times (-300)) = -2 \times 10^5 - (-3 \times 10^5) = -2 \times 10^5 + 3 \times (10)^5 = 10^5$  Дж.

То есть:

**сама потенциальная энергия  $E_{\text{п}}$  зависит от выбора нулевого положения, а её изменение  $\Delta E_{\text{п}}$  — не зависит!**

Физики говорят так: физический смысл имеет не сама потенциальная энергия  $E_{\text{п}}$ , а её изменение  $\Delta E_{\text{п}}$ . Они имеют в виду вот что: **экспериментально проявляется не сама  $E_{\text{п}}$ , а лишь её изменение,**

т. е. измеряется именно  $\Delta E_{\text{п}}$ , а не сама  $E_{\text{п}}$ . Для вычисления самой  $E_{\text{п}}$  нужно выбрать её где-то (при каком-то положении тела), принять равной нулю (обычно поступают так) или какому-то другому значению.

Вот и всё про относительность потенциальной энергии.\*

**Вопрос 60:** А кинетическая энергия тела — её значение относительно или абсолютно?

**Ответ 60:** Относительно. Значение  $E_{\text{к}}$  зависит от выбора тела, принятого за неподвижное в данной задаче. Иначе говоря, относительность  $E_{\text{к}}$  связана с относительностью значения скорости тела.

**Вопрос 61:** А есть хоть какие-то физические величины, про которые можно сказать, что они абсолютны?

**Ответ 61:** Есть: масса, энергия покоя тела, электрический заряд.

\* Аналогия: соревнования по прыжкам в высоту в зале на первом этаже и в зале на втором этаже. Высота прыжков над землёй будет существенно отличаться — примерно на высоту одного этажа. Но разница высоты прыжка практически не зависит от номера этажа.

**Вопрос 62:** Столб высотой  $l$  лежит на земле. Масса столба  $m$ . Какое количество энергии нам потребуется, чтобы поставить столб вертикально?

**Ответ 62:** Если считать, что вначале потенциальная энергия столба была нулевой, то у стоящего столба она будет больше. Именно эта энергия нам и потребуется. (Мы считаем, что подъём столба происходит очень медленно, как обычно и бывает в реальности, поэтому кинетическая энергия столбу практически не сообщается.) Какая же энергия будет у вертикального столба длиной  $l$  и массой  $m$ ?  $E_n = mgl$ ? Нет, конечно. Ведь на расстоянии  $l$  от земли находится только верхний конец столба. А, например, нижний его конец будет на нулевой высоте. Мы уже догадываемся, что искомая энергия окажется средним от двух крайних значений  $E_n$ , т. е.  $(mgl + mg0) = mgl/2$ .



Обоснуем этот ответ более аккуратно. Представим, что столб состоит из отдельных материальных точек с массой  $\Delta m$  каждая (см. рисунок). Тогда потенциальная энергия всего столба сложится из энергий отдельных его частей. Чтобы найти эту сумму, разобьём весь набор материальных точек на пары, равноотстоящие от середины столба. Энергию каждой пары можно заменить на энергию материальной точки с двойной массой ( $2\Delta m$ ), помещённой на высоте  $l/2$ , т. е. в середине столба:  $\Delta mgl + \Delta mg0 = \Delta mg(l - 1) + \Delta mg(0 + 1) = \dots = \Delta mgl/2$ . Короче говоря, мы можем заменить весь столб *материальной точкой*, расположенной в его центре (середине); масса этой материальной точки должна быть равна массе всего столба  $m$ , а потенциальная энергия будет  $E_n = mgl/2$ .\*\*

\* Покажем, что это так. Для произвольной пары материальных точек  $E_n = \Delta m(l/2 + x)g + \Delta m(l/2 - x)g = \Delta mlg = 2(\Delta m)(l/2)g$ , что и требовалось показать. Здесь  $x$  — расстояние, на которое материальные точки удалены от середины столба (одна на  $+x$ , а другая на  $-x$ ).

\*\* Вот доказательство. Если весь столб — это  $N$  материальных точек, то их можно разбить на  $N/2$  пар. А для каждой такой пары  $\Delta E_n = 2\Delta mgl/2$  (см. предыдущую сноску). Поэтому для  $N/2$  точек будет верно:  $E_n = (N/2)(\Delta m)(l/2)g = (N\Delta m)l/2)g = m(l/2)g$ , ч.т.д. (что и требовалось доказать).

Именно такая энергия нам и потребуется, чтобы не спеша поставить лежащий на земле столб вертикально.

**Вопрос 63:** Почему «не спеша»?

**Ответ 63:** Потому, что иначе нам придется израсходовать дополнительную энергию для сообщения столбу заметной скорости, т. е. на сообщение ему кинетической энергии. Если же не спешить (что почти всегда полезно), то при подъёме столба будет возрастать только его потенциальная энергия. Как мы вычислили — на величину  $mgl/2$ .

**Вопрос 64:** Бутылку шампанского массой  $m = 2$  кг альпинист занёс с побережья Индийского океана на Эверест, но не выпил, а сохранил до базового лагеря на высоте  $h = 1,5$  км. Как изменилась потенциальная энергия бутылки с шампанским?

**Ответ 64:**  $\Delta E_{гр} = mgh = 2 \times 10 \times 1500 = 30\,000$  Дж = 30 кДж. Изменение потенциальной энергии зависит только от конечной и начальной её величин и не зависит от того, как именно она менялась в ходе процесса, какие имела значения. Это замечательное качество — не зависеть от пути процесса, а зависеть только от двух точек: где всё началось и где всё закончилось, и это персональное свойство потенциальной энергии. Скажем, тепловая энергия (теплота) — совсем не такова.

\* Знаете ли вы, когда нужно спешить?

## 7. СОСЕДИ, ЛЫЖНИКИ И РАЗМЕРНОСТЬ (ЕДИНИЦЫ ЭНЕРГИИ)

Если вас опрашивает инспектор полиции — знаете ли вы мистера Смита, а вы отвечаете, что знаете только, как его зовут и с кем он иногда встречается, то инспектор сделает вывод, что по сути дела вы не знаете мистера Смита, хотя вот уже два года он — ваш сосед. Аналогичная ситуация у нас сложилась с единицами измерения энергии. Мы уже некоторое время работаем с ними: складываем, вычитаем, даже вычисляем (потенциальную энергию тела над землёй), знаем имя (джоули), знаем их друзей — метры, килограммы, секунды — именно с ними джоули соседствуют в одной системе единиц. Но *что такое* единица энергии 1 Дж?

Между тем, это нетрудно определить. Вспомним, что кинетическая энергия может быть вычислена по формуле:

$$E_k = mv^2/2, \text{ где } m \text{ — масса тела, а } v \text{ — его скорость.}$$

**Вопрос 65:** Когда можно пользоваться этой формулой?

**Ответ 65:** Для вычисления кинетической энергии материальной точки или для поступательного движения неточечного тела.

Тогда должно быть справедливо такое равенство:

1 единица энергии = 2 единицы массы  $\times$  (1 единицу скорости)  
в квадрате.

(Двойка нужна, чтобы в соответствии с формулой получилось  
 $1 = 2 \times (1)^2/2 = 2 \times 1/2 = 1.$ )

Поэтому получаем такое **определение 1 Дж:**

1 Дж — это такая кинетическая энергия, которую имеет тело (точнее материальная точка) массой 2 кг, двигающаяся со скоростью 1 м/с. Или символически:  $1 \text{ Дж} = (2\text{кг}) \times (1\text{м/с})^2/2.$

Итак, в определённой системе единиц (она называется международной — кратко СИ) —

**размерность энергии — это  $[\text{кг}] \times [(\text{м/с})^2]$**

**Вопрос 66:** Сколько джоулей энергии будет иметь тело массой 1 кг, движущееся со скоростью 2 м/с?

**Ответ 66:**  $E_k = 1 \times (2)^2/2 = 4/2 = 2 \text{ Дж}$

**Вопрос 67:** Пользуясь введённым определением, покажите, что размерность множителя  $g$  из выражения для потенциальной энергии тела над землёй действительно будет  $\text{м/с}^2$  (в системе единиц СИ).

**Ответ 67:** Так как  $E_p = mgh$ , то размерность  $g = (\text{размерность } E) / ((\text{размерность } m) \times (\text{размерность } h))$  т. е. размерность  $g = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{м}) = ((\text{кг}) \times (\text{м}^2)/(\text{с}^2))/(\text{кг} \cdot \text{м}) = \text{м}/(\text{с}^2).$

**Вопрос 68:** Если пользоваться другой системой единиц (многие физики считают её более удобной), в которой массу выражают в граммах (г), длину в сантиметрах (см), а время в тех же секундах (с), то и энергия у нас будет не в джоулях, а в других единицах, которые называют **эргами** (эрг). Если знать, что  $1 \text{ кг} = 10^3 \text{ г}$ , а  $1 \text{ м} = 10^2 \text{ см}$ , то сколько в 1 Дж эргов?

**Ответ 68:**  $1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг.}$

**Вопрос 69:** Почему *эрг* пишется не с заглавной буквы? Откуда, по вашему мнению, такое название «эрг»?

**Ответ 69:** Как ни странно, эрг назван не в честь знаменитого норвежского лыжника Эрга, а происходит просто от слова ЭНЕРГия.

**Вопрос 70:** Оцените, что больше: кинетическая энергия бегуна на дистанции 100 м или потенциальная энергия прыгуна во время его прыжка в высоту?\*

**Ответ 70:** Будем сравнивать энергии спортсменов примерно одинакового (мирового) класса. Примем массу каждого за 100 кг. (Может быть они и полегче, но так проще считать, а разница даже в 30 кг никак не повлияет на ответ.\*\* Будем считать, что бегун пробегает 100 м за 10 с, а прыгун прыгает на 2 м 30 см, т. е. на 2,3 м. Тогда  $E(\text{бег}) = mv^2/2 = 100 \times (10^2)/2 = 100 \times 100/2 = 5000 \text{ Дж} = 5 \times 10^3 \text{ Дж}$ . А  $E(\text{прыг}) = mgh = 100 \times 10 \times 2,3 = 2300 \text{ Дж} = 2,3 \times 10^3 \text{ Дж}$ . Видно, что *энергия бегуна больше — в два раза с запасом.*

\* Когда физику говорят ОЦЕНИТЕ, то он понимает, что ему нужно что-то сосчитать, получить число, но все необходимые для этого величины он должен ВЫБРАТЬ сам, исходя из заданной ситуации, своих знаний (иногда приходится консультироваться) и здравого смысла.

\*\* Почему?

## 8. Последовательность действий физика при решении задачи

После некоторых, не слишком малых усилий мы получили формулу для вычисления потенциальной энергии тела, поднятого над землёй:  $E = mgh$  (если принять энергию тела на уровне земли равной нулю). Чем она может быть нам полезна? Посмотрим это на простом примере.

### 8.1. БРОСАНИЕ МЯЧА ВВЕРХ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поставим такой серьёзный вопрос: сможете ли вы забросить теннисный мяч на крышу десятиэтажного дома? (Обратите внимание: это опять задача — оценка физического явления, процесса.) Попробуйте ответить на этот вопрос *сразу*, сейчас, исходя из чистой интуиции или из вашего детского опыта, — потом сравните наш научный ответ с вашим предсказанием, а в заключение можно поставить эксперимент (только не разбейте стекло!).

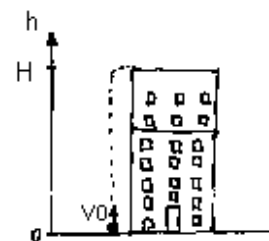
### 8.2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Приступим к делу. Наш основной инструмент — закон сохранения энергии. В формулировке Фейнмана он гласит, что общее число кубиков остаётся постоянным. То есть: сумма всех видов энергии мяча будет одной и той же, если никто или ничто со стороны не передаст ему (или не отнимет) дополнительную энергию. Сначала мысленно изолируем летящий мяч от возможных нарушителей закона сохранения. Будем рассматривать процесс, начиная с того момента, когда вы (ваша рука) только сообщили мячу начальную скорость и больше уже не действуете на него. Кроме того, *будем считать*, что сопротивление воздуха мало — тогда мы можем не учитывать уход части энергии в тепловую (нагрев воздуха, нагрев самого мяча). Позже мы сможем обсудить *разумность* такого предположения — о малости тепловых потерь по сравнению с другими видами энергии мяча,

т. е. насколько такое упрощение близко к реальному процессу. Обсуждение сделанных нами предположений, т. е. выбранной нами модели явления, очень важно. Ведь можно напредполагать такого, что наш ответ потеряет всякий смысл.

### 8.3. СХЕМАТИЧЕСКИЙ РИСУНОК

Это (рисунок) полезно делать практически для любой физической задачи. Тем самым мы подключаем наши глаза (и руки!) в помощь к нашему мозгу. Между прочим, некоторые люди воспринимают зрительные образы гораздо лучше, чем словесные. В любом случае это нам не повредит. Итак:



Примем потенциальную (гравитационную) энергию мяча на уровне земли, равной нулю. Запишем это условие так:  $E_{\text{п}}(h=0) = 0$ . Тогда, как мы знаем:  $E_{\text{п}}(h=H) = mgH$ , т. е. на уровне крыши эта энергия будет равна произведению массы мяча  $m$  на  $g$  и на высоту крыши над землёй  $H$ . Кроме того, у мяча может быть кинетическая энергия: на старте (сразу после броска рукой)  $E_{\text{к}}(h=0) = m(v_0)^2/2$ , а на уровне крыши  $E_{\text{к}}(h=H) = mV^2/2$ , где  $V$  — скорость мяча на уровне крыши.

### 8.4. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ

Теперь запишем закон сохранения энергии для рассматриваемого случая — суммарная энергия мяча на старте = суммарная энергия мяча на уровне крыши:

$$E_{\text{п}}(0) + E_{\text{к}}(0) = E_{\text{п}}(H) + E_{\text{к}}(H)$$

или

$$0 + m(v_0)^2/2 = mgH + mV^2/2 \quad (*)$$

Ясно, что в этой задаче нас интересует **минимальная** начальная скорость мяча, такая, чтобы он только-только долетел до крыши. Поэтому в равенстве (\*) нужно положить скорость мяча на уровне крыши  $V = 0$ . Тогда равенство (\*) примет вид:

$$m(v_0)^2/2 = mgH$$

или, деля обе части равенства на  $m$  и домножая на двойку:

$$v_0^2 = 2gH \quad (**)$$

## 8.5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ

Теперь у нас есть всё для решения задачи. Наш план такой: выбрать конкретное значение высоты дома, соответствующее условию (10-ый этаж), вычислить необходимое значение  $v_0$  по формуле (\*\*) и прикинуть (исходя из жизненного опыта и здравого смысла) — сможем ли мы кинуть теннисный мяч с такой скоростью.

Если у вас нет возражений, примем высоту десятиэтажного дома равной 30 м, т. е. возьмём по три метра на этаж — не особняк, но всё-таки.

## 8.6. ВЫЧИСЛЕНИЯ

Тогда

$$v_0^2 = 2 \times 10 \times 30 = 600 \text{ или } v_0 \approx 24,5 \text{ м/с}$$

Т. е. получилось, что нужно кидать мяч со скоростью **примерно 25 м/с** (25 в квадрате равно 625 — чуть больше 600, но ведь мы делаем *оценку*, т. е. слишком большая точность нам не нужна).

## 8.7. ОЦЕНКА РЕАЛЬНОСТИ ПОЛУЧЕННОГО ОТВЕТА

Осталось выяснить: реально ли для нас бросить теннисный мяч с такой (или большей) скоростью. Возможно, это самое сложное в нашей задаче.

Попробуем вспомнить какие-нибудь известные нам скорости движений, и сравним их с тем, что требуется от нашей руки. Ну, скажем, у нас уже был пример с бегуном на 100 м — чемпионы бегут эту дистанцию примерно за 10 секунд, т. е. со скоростью

где-то 10 м/с. Каждый из нас хоть раз мог наблюдать за такими соревнованиями хотя бы по телевизору. Способны ли вы бросить мяч так, чтобы он полетел быстрее бегуна? (Обратите внимание, что речь идёт именно о стартовой скорости мяча, с ростом высоты она, конечно, будет падать.) Похоже, что бросить быстрее, чем 10 м/с, для нас не будет проблемой — по крайней мере, об этом говорят собственные воспоминания авторов. (Уверены, что читатели могли бы превзойти нас.)

Но что даёт нам этот результат ( $v_0 = 10$  м/с вполне реальна), если нам нужно оценить реальность примерно 25 м/с? А вот что. Если бы скорость 10 м/с оказалась нереальной, то мы сразу бы закончили решение нашей задачи: нет, мы не сможем забросить мяч на крышу такого дома. Т. е. сама попытка сравнить бег с броском мяча была разумной, но не вполне удачной. (Отрицательный результат — тоже результат.) Попробуем ещё раз.

Может, заглянуть в какой-нибудь справочник, где могут быть скорости движения разных животных, людей, механизмов в различных ситуациях? Мысль здравая, но, как это часто бывает, вспоминаем, что под рукой нет подходящего справочника, а искать в Интернете или идти в библиотеку — лень. Тогда поступим иначе. Нам нужно движение со скоростью 25 м/с. Может, взять самую простую ситуацию — движущуюся машину? Но для машины нам понятны скорости совсем в других единицах — например, в милях в час. Что ж, переведём 25 м/с в мили в час. 1 миля — примерно 1600 м, значит 1 м =  $(1/1600)$  мили. А 1 час — это 60 минут. В каждой минуте по 60 с, поэтому 1 час = 60 мин =  $60 \times 60 = 3600$  с. Тогда 1 с =  $(1/3600)$  часа. В результате имеем:  $25 \text{ м/с} = 25 \times ((1/1600) \text{ миль} / (1/3600) \text{ часа}) = 25 \times (3600/1600) = 25 \times (36/16) = 25 \times (9/4) \approx 56 \text{ миль/час}$ .

## 8.8. ОТВЕТ

Итак, вопрос: сможем ли мы бросить мяч так, чтобы он не отстал (а лучше чуть опередил) в первый момент машину, проезжающую мимо нас со скоростью 56 миль/час? Примеряя эту ситуацию на себя, авторы пришли к такому выводу: возможно, это удастся сделать, но такая скорость бросания мяча — где-то на пределе их физических способностей. Поэтому применительно к авторам ответ такой: если мы будем в хорошей физической форме, то удастся. Надеемся, что вы не очень разочарованы, что



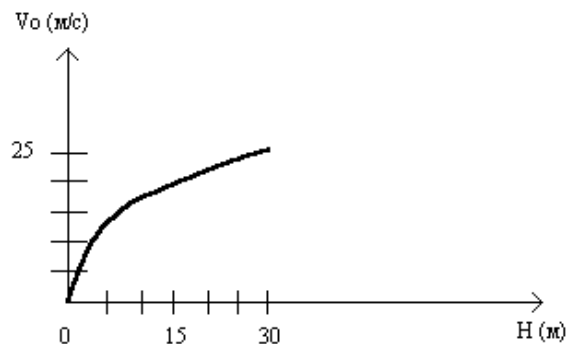
не удалось получить какой-то универсальный ответ, годный для любого человека. Ведь и сама постановка задачи («Удастся ли вам...») предполагала именно индивидуальный ответ.

## 8.9. АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ: ГРАФИК

Мы ответили, как могли, на вопрос задачи, но ведь любая задача для нас — не самоцель, а средство для того, чтобы научиться понимать и решать следующие задачи. Поэтому после формального решения всегда полезно немножко повозиться с уже решённой задачей (как кошка играет с уже пойманной мышью).

Например, всегда полезно изобразить на графике полученную зависимость величин.

А потом из графика можно попытаться увидеть какие-то закономерности, часто скрытые в формуле. Для нашего случая построим зависимость необходимой начальной скорости мяча  $v_0$  от высоты крыши  $H$  — см. формулу (\*\*). Здесь есть два пути: или преобразовать (\*\*) в соотношение  $v_0 = \sqrt{2gH}$  и провести кривую, соответствующую *корневой* зависимости, или, если вы не знакомы с построением корневых графиков, построить зависимость «по точкам» — выбрать ряд значений  $H$  (например, 0, 1, 2, 3, 4, 5 — достаточно!) и построить график. У вас получится примерно такая картинка:



Зависимость необходимой начальной скорости мяча от высоты крыши

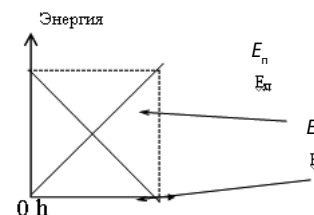
Из этого графика, например, видно, что необходимая скорость бросания мяча действительно растёт с увеличением высоты крыши, но не равномерно: сначала быстрее, а чем выше крыша, тем медленнее (кривая становится положе).

**Вопрос 71:** Верно ли утверждение, что мяч, брошенный вертикально вверх, на половине высоты своего максимального подъёма теряет половину своей скорости? Теряет половину своей кинетической энергии?

**Ответ 71:** Первое неверно, а второе верно.

**Вопрос 72:** На одном и том же рисунке постройте зависимость  $E_n$  мяча от его высоты над землей  $h$  и  $E_k$  мяча тоже от  $h$ .

**Ответ 72:** См. рис.:



## 8.10. АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ: независимость от массы

Интересное наблюдение: из (\*\*) следует, что высота, на которую мы можем забросить мяч, зависит только от скорости, которую мы придадим мячу, и вовсе не зависит от его массы! Не странно ли это, не противоречит ли это нашему опыту? Попробуем разобраться. Ну, во-первых, сама  $v_0$  зависит от массы мяча — ясно, что более тяжелый футбольный мяч мы не сможем бросить с той же скоростью, как теннисный. А во-вторых, мы ведь сами выбрали такую модель явления, в которой мы пренебрегаем сопротивлением среды (воздуха). Ясно, что воздух будет меньше влиять на теннисный мяч, чем на футбольный. Не исключено, что при учёте сопротивления воздуха появится зависимость от массы мяча. Или может быть от его размеров (радиуса)? Посмотрим, когда до этого дойдёт дело.

**Вопрос 73:** Можно ли сделать такой вывод из предыдущего замечания: чем больше масса мяча, тем больше влияет сопротивление воздуха на движение мяча?

**Ответ 73:** Не всё так просто. Бросьте вверх мячик от пинг-понга. Всё понятно? Поэтому ответ такой: нельзя. Требуется более тщательный анализ происходящего. Удивительно, как в самых простых явлениях обнаруживаются совсем неочевидные вещи.

**Вопрос 74:** Если тело бросили вверх с начальной скоростью  $v_0$ , то какую скорость оно будет иметь на половине максимальной высоты подъёма?

**Ответ 74:**  $h(\max) = v_0^2/2g$  — см. (\*\*). По закону сохранения энергии  $mv_0^2/2 = mgh(\max) + mV^2/2$ . Поэтому  $V^2 = v_0^2 - 2gh(\max) = v_0^2 - 2g(v_0^2/4g) = v_0^2/2$ . Отсюда искомая скорость будет  $V = v_0/\sqrt{2}$ .

## 8.11. ПРОВЕРКА ПО РАЗМЕРНОСТИ

**Вопрос 75:** Проверьте размерность выражения для  $h(\max) = v_0^2/2g$ . Действительно ли получаются метры?

Проверка выражения, полученного при решении задачи, по размерности — универсальный приём. Обычно это первое, что делает физик, получив искомое выражение. Но на этом его работа не заканчивается.

## 8.12. ПРОВЕРКА НА ПРЕДЕЛЬНОМ СЛУЧАЕ —

...*важнейший* способ проверки правильности решения физической задачи.

Смысл этого приёма в подстановке в полученную формулу конкретных значений, при которых нам *заранее* известно, что (сколько) должно получиться в итоге.

Применим этот приём к проверке выражения  $h(\max) = v_0^2/2g$ .

На какую максимальную высоту поднимется тело, брошенное с начальной скоростью  $v_0 = 0$ ? Ясно на какую:  $h(\max) = 0$ . Получится ли то же самое из проверяемой формулы? Посмотрим: подставим в неё  $v_0 = 0$ , получим:  $h(\max) = 0^2/2g = 0$ . Работает!

А что будет с  $h(\max)$  при ужасно большой (бесконечно большой) скорости  $v_0$ ? Ясно, что и высота подъёма будет бесконечно большой:  $h(\max) = \text{бесконечность}$ . А что получается из проверяемого выражения? Если формально подставить вместо  $v_0$  «очень много» (бесконечность) и возвести «очень много» в квадрат, то получится ещё больше, т. е. тоже «очень много» (бесконечность). Осталось поделить «бесконечность» на  $2g$ . Поскольку умножение бесконечно большой величины на любое конечное число, например, на  $2g$ , даёт по-прежнему бесконечность, то и деление на  $2g$  даст тоже бесконечность. Т.е. и в этом случае формула работает. Но это ещё не всё.

Что будет с высотой подъёма тела, если земная гравитация станет ужасно сильной, бесконечно сильной? Понятно, что при бесконечно большой гравитации  $h(\max) = 0$ , т.е. тело не под-

нимется ни на сколько с поверхности такой жестокой планеты. А что мы видим из формулы? При делении  $v^2$  на бесконечность получится как раз ноль!

Теперь понятен смысл термина «**предельный случай**». Обычно это ситуация при самых маленьких (часто нулевых) или самых больших значениях какой-то величины. Но не обязательно. На протяжении всего курса нам предстоит регулярно пользоваться этим приёмом.

Итак, **при решении задачи для физика характерна такая последовательность действий:**

- 1) Чётко поставить (сформулировать) задачу.
- 2) Выбрать *модель* рассматриваемого явления (ввести пренебрежения, допущения, ограничения).
- 3) *Нарисовать* задачу.
- 4) Выбрать основные законы (*уравнения*).
- 5) *Решить* уравнение (систему уравнений).
- 6) Проверить ответ *по размерности*.
- 7) Проверить ответ *на предельных случаях*.
- 8) Сделать *оценку разумности* ответа.
- 9) Поискать в результатах решения чего-нибудь интересного, сделать возможные *предсказания* (следствия).

В соответствии с только что указанным нарисуем это схематически:

БЛОК-СХЕМА РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

ПОСТАНОВКА → МОДЕЛЬ → РИСУНОК → УРАВНЕНИЯ →  
→ РЕШЕНИЕ → ПРОВЕРКА → СЛЕДСТВИЯ

**Вопрос 76:** Верно ли утверждение: если бросить мяч вертикально вверх, то на одной и той же высоте его скорость на пути вверх (к высшей точке полёта) и на пути вниз будет одной и той же?

**Ответ 76:** По закону сохранения энергии на одной и той же высоте кинетические энергии тел должны быть одинаковы, независимо от того, куда они летят. Из равенства кинетических энергий сразу следует равенство квадратов скоростей, а из него — равенство *величин* самих скоростей. Формально (в уравнениях) мы сможем, конечно, отличить скорость вверх от скорости вниз — у них будут разные знаки. Но величины скоростей (в отсутствие сопротивления среды) будут одинаковы.

**Вопрос 77:** Это *трудный вопрос*. Как вы думаете, что больше: время подъёма тела до максимальной высоты или время его спуска? Рассмотрите случай, когда учитывается сопротивление среды.

**Ответ 77:** Если не учитывать сопротивление, то почти очевидно, что ситуация будет симметрична: то, что на подъёме было у тела вначале (высоты, скорости), повторится у него же на спуске в конце, и наоборот. Поэтому в случае, когда не учитывается сопротивление среды, время подъёма должно равняться времени спуска. Разумеется, это нестрогие размышления, а не доказательство. Но это очень похоже на правду. Проверить её мы сможем буквально в следующей главе.

Теперь попробуем учесть сопротивление среды. Из симметрии задачи (см. предыдущий абзац) понятно, что величина сопротивления будет одной и той же и на подъёме, и на спуске. Но на подъёме оно уменьшит высоту максимального подъёма, т.е., видимо, уменьшит и время полёта тела (по сравнению со случаем, когда сопротивления нет). А на спуске сопротивление как бы затянет полёт. Ведь фактор сопротивления среды всегда направлен *навстречу* скорости тела.

**Вопрос 78:** Тело упало с некоторой высоты на землю. Куда делась его энергия?

**Ответ 78:** Если тело уже лежит на земле, то его начальная энергия частично пошла на то, чтобы преодолеть сопротивление среды, в результате немного нагрелся окружающий воздух, нагрелось само тело (всё это тепловая энергия, о которой разговор впереди). Ещё энергия падения пошла, научно говоря, на деформацию земли в месте падения (ямка, может быть даже яма, а от метеорита даже ямища). Ещё — на деформацию самого тела, может быть даже на его разрушение. Нагрев тела может привести к его плавлению или даже к испарению. Ещё — на возникновение колебаний потревоженного воздуха и на их распространение в воздухе — от места движения тела — дальше (мы обсудим это явление в главе *Звук*). На всё это уходит энергия падающего тела.

**Вопрос 79:** С высоты  $H$  вертикально бросают мяч со скоростью  $v_0$  — один раз вверх, а другой — вниз. В каком случае скорость падения мяча на землю больше?

**Ответ 79:** Из закона сохранения энергии следует, что скорости мяча на уровне земли будут одинаковы.

**Вопрос 80:** Одно тело бросают вверх со скоростью  $v_0$ . В тот же момент времени с максимально возможной для первого тела высоты полёта начинает падать без начальной скорости второе такое же тело. Где они встретятся: выше половины максимальной высоты полёта или ниже?

**Ответ 80:** Попробуем решить задачу чисто качественно, путем рассуждений, а не вычислений. Такой подход почти всегда элегантнее, но зато он бывает трудным или даже невозможным. Очевидно, верхнее тело будет набирать свою скорость неравномерно: сначала помедленнее, а потом всё быстрее и быстрее. Поэтому верхнюю половину своего пути оно пройдёт медленнее, чем нижнюю. Для нижнего тела — наоборот, нижнюю половину оно пройдёт быстрее, чем верхнюю. Из этих рассуждений сразу следует, что встретятся они выше середины половины максимальной высоты.

(Аналитическое — «формульное» — решение этой задачи потребовало бы примерно 3/4 страницы вычислений.)

## 9. ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Когда мы хотим знать значение какой-то физической величины, у нас в принципе есть два пути: измерить её или вычислить. Что лучше? *Лучше то, что проще.* (Если нам неизвестна формула для вычисления, то остаётся только измерять.) В других случаях лучше то, что даёт *более точный результат.* Бывает так, что необходимо и то, и другое — например, чтобы проверить формулу, по которой мы вычисляем. Но в большинстве случаев, с которыми мы будем иметь дело, вычисление — просто единственный способ узнать, к примеру, чему равна гравитационная потенциальная энергия крыши вашего дома (представляете, как не хочется измерять эту энергию, — для этого крышу нужно отделять от дома, она должна куда-то падать, что-то (кого-то) ломать или нагревать...). Поэтому хорошо бы иметь в нашем активе формулы для *вычисления* основных видов энергий.

Разве мы не получили выражения, позволяющего вычислить эту энергию:  $E_{\text{п}} = mgh$ ? Получили, но дело в том, что мы рассмотрели очень важный, но всё-таки частный случай — энергию тела, взаимодействующего с *Землёй*. У Земли громадная масса — приблизительно  $10^{24}$  кг, поэтому любое тело, кроме самых лёгких частиц (типа *электрона* с массой  $10^{-31}$  кг заметно взаимодействует с Землёй. А поскольку мы с вами живём именно на Земле, то у неё нет конкурентов по части гравитации среди всего, что нас окружает. Нет ничего странного в том, что мы начали расчёты гравитационной энергии именно с взаимодействия произвольного тела с Землёй.

### 9.1. ГИПОТЕЗА

Но дело в том, что в гравитационном взаимодействии участвуют не только Земля с кем-то. Все тела притягиваются друг к другу просто потому, что они имеют какую-то массу. И это взаимодействие тем сильнее, чем больше массы тел. Об этом свидетельствуют все эксперименты, которые когда-либо были

поставлены физиками. Кроме того, как всякая потенциальная энергия  $E_{\text{гр}}$  зависит от взаимного расположения взаимодействующих тел. Если выбрать простейший случай — взаимодействие двух материальных точек, то  $E_{\text{гр}}$  должна зависеть попросту от расстояния между ними.

Сказанное выше наталкивает нас на *предположение*, что эта энергия будет прямо пропорциональна массам взаимодействующих тел и обратно пропорциональна расстоянию между ними:

$$E_{\text{гр}} \sim m_1 m_2 / R \text{ (материальные точки)}$$

### 9.2. ОБСУЖДЕНИЕ

Так как это всего лишь предположение, то возникает ряд вопросов. Первый: почему в числителе выражения для  $E_{\text{гр}}$  у нас именно *произведение масс*, а не, скажем, их разность или их сумма? Второй: почему в знаменателе  $R$  стоит именно в первой степени, а не, скажем, в квадрате?

Отвечаем в порядке поступления вопросов. Первая мысль, которая возникает про варианты с произведением масс и с их суммой, — это то, что произведение масс необходимо для соблюдения одинаковой размерности левой и правой части этого равенства, а при сумме масс это равенство размерностей будет нарушаться. Но это не так. Ведь обсуждаемое нами выражение не равенство, а пропорциональность, т.е. справа в нем должен быть какой-то множитель, размерность которого нам неизвестна.

На помощь приходит **способ проверки на предельном случае**. Сначала «расправимся» с гипотезой о *разности* масс в числителе. Предположим, что справедливо выражение  $E_{\text{гр}} \sim (m_1 - m_2) / R$ . Но тогда в случае, когда  $m_1 = m_2$ , мы получаем  $E_{\text{гр}} = 0$ . Это явная нелепость: с какой стати энергия взаимодействия двух *равных* (но, возможно, вполне заметных) масс должна быть нулевой? Что, равные массы не будут взаимодействовать друг с другом? Вспомним про экспериментальный факт: гравитация тем сильнее, чем больше *каждая* из взаимодействующих масс. Поэтому разности масс в числителе не может быть.

Теперь посмотрим, к чему приводит гипотеза  $E_{\text{гр}} \sim (m_1 + m_2) / R$ . В предельном случае, когда одна из масс ( $m_1$ ) ужасно мала («бесконечно мала»), мы получим:  $E_{\text{гр}} \sim m_2 / R$ . Возможно ли такое? Получается, что если тело  $m_2$  взаимодействует с *почти нулевой* массой  $m_1$ , то  $E_{\text{гр}}$  может быть очень даже велика (представьте,

что  $m_2 = M$  Земли). А если  $m_1$  вообще нет, то и разговора о  $E_{\text{гр}}$  тоже нет — она равна нулю — не с кем взаимодействовать! Итак, достаточно массе  $m_1$  бесконечно мало измениться — от, скажем,  $10^{-30}$  кг до нуля — как энергия гравитации изменится от большой величины ( $E_{\text{гр}} \sim M/R$ ) до нуля, т.е. скачком. Всё, что мы знаем о природе, говорит нам, что природа не терпит таких скачков! **Чтобы был скачок какой-то величины, тем более энергии, необходимы видимые физические причины.** В данном случае их нет. Поэтому гипотеза о *сумме* масс в числителе выражения для  $E_{\text{гр}}$  тоже отпадает.\*

**Вопрос 81:** А почему невозможна такая зависимость:  $E_{\text{гр}} \sim m_1^2 m_2$ ?

Или  $E_{\text{гр}} \sim m_1 m_2^2$ ?

**Ответ 81:** Это следует из симметрии задачи. Что будет с потенциальной энергией, если мы в её формуле поменяем местами индексы 1 и 2? (Физически это соответствует тому, что мы поменяли местами  $m_1$  и  $m_2$ .) Так как потенциальная энергия по смыслу — это энергия положения тела относительно другого тела, то от нашей операции она не могла измениться. А для этого массы тел в формуле должны быть равноправны, т.е. иметь одну и ту же степень.

В данном случае мы воспользовались физической симметрией ситуации относительно перемены индексов. Такой приём — **использование имеющейся в задаче симметрии** — обычно приводит к резкому упрощению решения. Часто это буквально единственный путь к решению.

**Вопрос 82:** Пользуясь анализом на предельном случае, покажите, что формула зависимости пути  $s$ , пройденного телом, от времени движения  $t$ :  $s = t/v$  — не может быть верна.

**Ответ 82:** Рассмотрим предельный случай, когда  $v = 0$ . Ясно, что тогда и  $s$  должно быть нулём. Но из предложенной формулы это не следует. Значит, она неверна.

**Вопрос 83:** Можно ли ещё как-то увидеть негодность формулы из предыдущего вопроса?

**Ответ 83:** Сравнивая размерность левой и правой части равенства.

\* Похожая аргументация: ясно, что энергии взаимного притяжения слона с Землёй и пушинки с Землёй (на одном и том же расстоянии) должны сильно отличаться. Но при сумме масс в числителе обсуждаемой нами зависимости этого различия мы почти не заметим, так как масса Земли настолько больше массы слона, что энергии в этих двух случаях (слон и пушинка) практически совпадут.

### 9.3. ОБСУЖДЕНИЕ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

Напомним, что мы подробно ответили только на первый из двух вопросов про вид  $E_{\text{гр}}$ . *Второй вопрос* был про знаменатель выражения: почему там стоит  $R$  именно в *первой степени*. Здесь нам придется сложнее. То, что  $R$  должно быть в знаменателе, очевидно — ведь величина взаимодействия *убывает* с ростом  $R$ . Но почему именно в *первой* степени? К сожалению, мы здесь можем дать лишь такой ответ, который всегда можно дать на физическое «Почему?» А именно: **из опыта** (конечно, имеются в виду физические опыты). Уточним. Позднее мы покажем, что если в выражении для  $E_{\text{гр}}$  расстояние между телами  $R$  будет не в первой степени, то будет нарушаться *закон всемирного тяготения*, который как раз и следует из многочисленных экспериментов многочисленных физиков в течение сотен лет. Конечно, ссылка на опыты делается не от хорошей жизни, лучше бы **логически** или **математически** обосновать наше утверждение, но такие ситуации неизбежны в науке, которая основным критерием правильности своих утверждений выбрала **ОПЫТ**. Можно даже было бы сформулировать **основную цель физики** как *сведение числа таких утверждений (следующих только из опыта) к минимуму*.

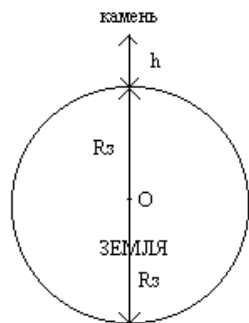
### 9.4. ИТАК

...для пары материальных точек с массами  $m_1$  и  $m_2$ , находящихся на расстоянии  $R$  друг от друга, энергия их гравитационного взаимодействия (их потенциальная гравитационная энергия) есть

$$E_{\text{гр}} \sim m_1 m_2 / R \quad (*)$$

Что значит «для материальных точек»? Это значит — для тел, расстояние между которыми  $R$  много больше их собственных размеров. Например, соотношением можно пользоваться для описания взаимодействия Земли и Солнца. А как насчет Земли и камня? Только в случае, когда расстояние между ними много больше радиуса Земли? Нет! Если  $R$  в выражении (\*) принять равным расстоянию от камня до *центра Земли*, т.е. считать  $R = R_{\text{(Земли)}} + h$  (высота камня над поверхностью), то все будет в порядке. Почему? Дело в том, что часть массы Земли находится от камня на расстоянии  $R > R_{\text{(Земли)}} + h$ , а часть на расстоянии

$R < R_{\text{Земли}} + h$ . Учитывая, что Земля сферически симметрична, можно заменить её на материальную точку, расположенную там, где находится центр Земли, и с массой, равной массе всей Земли.



Гравитационное взаимодействие камня с Землёй

**Вопрос 84:** В процессе замены реального земного шара на материальную точку мы сделали одно неявное допущение. Какое?

**Ответ 84:** Мы предполагали, что масса Земли распределена по её объёму равномерно, иначе говоря, что Земля однородна по плотности.

Запишем, наконец, выражение для гравитационной энергии в виде равенства. Для этого введём некоторый коэффициент пропорциональности  $\gamma$ , который должен быть одним и тем же для любой пары тел, т. е., как говорят, мировой постоянной. И ещё поставим знак минус:

$$E_{\text{гр}} = -m_1 m_2 / R$$

**Вопрос 85:** Откуда минус?

**Ответ 85:** Из принятого нами соглашения: на очень большом расстоянии (на бесконечности)  $E_{\text{гр}} = 0$ . А с ростом  $R$  эта энергия должна уменьшаться.

**Вопрос 86:** А это почему?

Эта зависимость справедлива не только для материальных точек, но и для взаимодействия однородных шаров. Но тогда встаёт вопрос: чему же равна энергия тела, поднятого над Землёй: « $mgh$ » или « $-m_1 m_2 / R$ »? Или, как мы догадываемся, это просто одно и то же выражение? Отложим ответ на некоторое время, отдохнём от гравитационной энергии. И обратимся к электрической.

## 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

### 10.1. ВСПОМНИМ СИТУАЦИЮ

...с расчёской и кусочками бумаги. Очевидно, что, потеряв расчёску о волосы, мы что-то в ней изменили, привели её в особое состояние. И когда мы поднесли расчёску к бумажкам, это состояние как-то передалось им. В результате два тела с «особинкой» безошибочно выделили друг друга среди всех прочих — притянулись, т. е. стали взаимодействовать. Непохоже, чтобы это притяжение было гравитацией. Просто потому, что чуть более крупные (с большей массой) бумажки притянуть не удастся. Таково внешнее, макроскопическое описание ситуации.

Попробуем немного разъяснить её. Для этого, как мы уже не раз делали, опишем то же самое на микроскопическом уровне: что при этом происходит с микрочастицами, из которых состоит и расчёска, и бумажки, и волосы.

Нам уже известно, что **все** частицы обладают способностью притягивать друг друга просто потому, что у них есть масса. Другой экспериментальный факт состоит в том, что **некоторые** микрочастицы могут обладать особым свойством — *электрическим зарядом*. Это свойство можно измерить количественно — существуют единицы заряда. Понятно, что чем больше электрический заряд частицы, тем активнее она будет участвовать в электрическом взаимодействии со всеми другими частицами, которым тоже посчастливилось иметь электрический заряд.

### 10.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ

В этом смысле электрический заряд  $q$  (будем его обозначать так) удивительно похож на массу  $m$ . Недаром массу иногда называют гравитационным зарядом. Но есть и существенные различия. Первое, о чём мы уже говорили — масса есть у любой частицы, а электрический заряд — далеко не у каждой. А кроме того, существуют электрические заряды двух типов, двух сортов. Их принято называть «плюс» и «минус», хотя могли бы назвать

«заряды типа А и типа В» или «красные и зеленые» или как-то ещё. Из опыта известно, что заряды одного типа отталкиваются друг от друга, а разных типов — притягиваются. (Сравните: гравитация знает только один тип зарядов, только притяжение друг к другу).

Мы знаем, что все тела состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из ядер и электронов, окружающих ядра. Разберёмся с их электрическими зарядами. Начнём из глубины. Электроны имеют электрический заряд (об этом можно судить по их «имени»), причём это заряд того типа, который назвали «минус». В дальнейшем мы будем говорить так: электрон имеет отрицательный заряд, а писать будем так:  $q(e) = -1,6 \times 10^{-19}$  Кл (Кл — это сокращение от Кулон\* — единицы измерения заряда в нашей системе единиц). Заряд электрона очень мал. Настолько мал, что меньше в природе не бывает!\*\*

Перейдём к ядру. Оно состоит из нейтронов (и вы догадываетесь, что они электрически нейтральны, не имеют заряда) и протонов, заряженных положительно. Заряд протона в точности равен заряду электрона, но только он другого типа: можно написать, что  $q(p) > 0$ . (Ясно, что все ядро в целом заряжено положительно.) Число протонов в ядре равно числу электронов в атоме. Но тогда получается, что **атом в целом электрически нейтрален**. Это действительно так. В частности, поэтому мы с вами, состоящие из громадного числа атомов, в каждом из которых есть электрические заряды, совсем не действуем друг на друга электрически.

### 10.3. МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ

**Вопрос 87:** Как же смогла зарядиться расчёска после расчёсывания волос?

**Ответ 87:** Можно предположить, что в процессе трения друг о друга часть заряженных частиц с одного тела (расчески) перешла на другое. В результате нейтральность тел нарушилась: в одном образовался избыток, например, минус-зарядов (электронов!), а в другом — их недостаток. В результате одно из тел стало заряженным отрицательно, а другое — положительно.\*\*\*

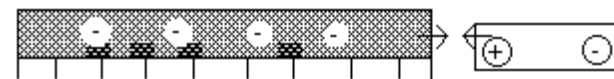
\* В честь французского физика Шарля Кулона, мы с ним ещё встретимся.

\*\* Кроме электрического заряда кварков (см.).

\*\*\* На самом деле электроны могут переходить с одного тела на другое просто при сильном сближении атомов, а трение просто увеличивает число таких сближенных атомов.

**Вопрос 88:** А как объяснить притяжение уже заряженной расчёски с нейтральными бумажками?

**Ответ 88:** Дело в том, что электроны — лёгкие, а ядра — тяжелее в тысячи раз. Когда мы приближаем отрицательно заряженную расчёску к бумажке, электроны бумажки, которые тоже имеют минус-заряд, отталкиваются от минусов расчёски и стараются убежать от них как можно дальше, на дальний (от расчёски) край листка. Причём, из-за своей малой массы они легко могут это сделать. А плюс-ядра, конечно, хотели бы придвинуться поближе к расчёске, но их большая масса обрекает их на практическую неподвижность. И получается, что близкая к расчёске поверхность бумаги заряжена положительно (страдает нехваткой электронов). Вот и возникает притяжение между заряженной расчёской и нейтральной бумажкой, в которой нарушено равномерное распределение плюсов и минусов. В результате плюсы бумажки оказались ближе к минус-расчёске, а минусы бумажки (которых ровно столько же, сколько плюсов — бумажка в целом нейтральна) — дальше.



Расчёска и бумага

### 10.4. ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Вернёмся от объяснения происходившего в экспериментах с расчёской к потенциальной энергии электрического взаимодействия. Традиционный вопрос: от чего она зависит? Теперь мы уже опытные люди и можем с достаточной уверенностью высказать гипотезу:  $E_{эл}$  должна зависеть от величин зарядов взаимодействующих тел, и от расстояния между телами. Неплохо для начала считать эти тела материальными точками. И уж совсем расхрибавшись, **по аналогии** с гравитацией, можно предположить, что

$$E_{эл} \sim q_1 q_2 / R \text{ (для двух точечных зарядов).}$$

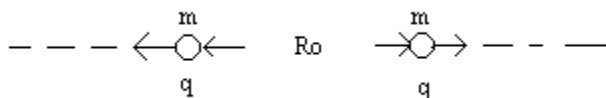
Поразительно, но у электричества и гравитации действительно столько общего, сколько можно заметить, глядя на выражения для  $E_{эл}$  и  $E_{гр}$ . Сравните!

## 11. ПЕРЕХОДЫ ЭНЕРГИИ С УЧАСТИЕМ $E_{эл}$

Если мы приобрели новый диск, хочется побыстрее его послушать или посмотреть, а новую формулу — использовать для решения задачи.

### 11.1. ПУСТЬ У НАС ЕСТЬ

...два одинаковых шарика — у каждого масса  $m$ . И пусть они одинаково заряжены — имеют заряд  $q$ . Разумеется, шарики маленькие (в том смысле, что их радиусы много меньше всех расстояний, которые будут у нас в задаче). Короче, шары можно считать материальными точками. Ясно, что шарики будут отталкиваться друг от друга, ведь они имеют заряды одного знака. Но вначале их удерживают на некотором расстоянии  $R_0$  и они неподвижны. Потом шарики отпускают, и они «разбегаются». Какую скорость приобретут шары в результате разбега?



РАЗБЕГАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ШАРОВ

Будем считать, что массы шариков малы, и тогда их притяжением к Земле можно пренебречь, а значит, можно считать, что они движутся вдоль прямой. Кроме того, пренебрежём гравитационным взаимодействием шаров друг с другом. Неочевидно, что это можно делать, но пока просто поверим в разумность предположения: электрическое взаимодействие заметно сильнее гравитационного (на одинаковом расстоянии).

Запишем закон сохранения энергии для системы из двух шаров:

**энергия в начале = энергия в конце их взаимодействия.**

В начальный момент кинетическая энергия обоих шаров ноль, а потенциальная — это энергия их электрического (его ещё называют кулоновским) взаимодействия. Тогда

$$E_0 = 0 + 0 + k(qq/R_0),$$

где через  $k$  мы обозначили коэффициент пропорциональности в выражении для кулоновской энергии.\*

Всё заканчивается разлётом шаров, который будет продолжаться, пока у шаров есть возможность уйти подальше друг от друга. По нашей модели явления никаких других факторов, кроме кулоновского отталкивания, нет. Значит, они разбегутся на бесконечно большое расстояние. Нетрудно видеть, что на таком расстоянии  $E_{эл} = kq^2/(\text{бесконечность}) = 0$ .

Зато каждый из шаров приобретёт кинетическую энергию. Из симметрии задачи (одинаковые шары) следует, что их энергии на бесконечности должны быть одинаковы. Тогда для системы тел:

$$E(\text{бесконечность}) = mv^2/2 + mv^2/2 + 0$$

и по закону сохранения энергии

$$0 + 0 + kq^2/R_0 = 2mv^2/2 + 0 \text{ или}$$

$$kq^2/R_0 = mv^2 \quad (**)$$

Отсюда, зная величину зарядов и начальное расстояние  $R_0$ , можно найти скорости шаров:

$$v = \sqrt{(k/R_0 m) \times q} \quad (**)$$

**Вопрос 89:** Проверьте полученное выражение по размерности и на предельном случае.

### 11.2. СДЕЛАЕМ ОЦЕНКУ

...полученной конечной скорости для случая разлёта двух электронов, стартовавших с расстояния 1 м друг от друга. Необходимые данные: заряд электрона  $q(e) = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл,  $R_0 = 1$  м,  $k = 9 \times 10^9$ ,  $m(e) = 9 \times 10^{-31}$  кг. Подставляя все эти числа в формулу (\*\*), получим:

$$v = \sqrt{9 \times 10^9 / (9 \times 10^{-31} \times 1)} \times 1,6 \times 10^{-19} = 16 \text{ м/с}$$

т. е., разлетевшись на бесконечно большое расстояние, электроны будут двигаться со скоростью примерно  $v = 16$  м/с. (Признайтесь, что вы ожидали большего...)

Разумеется, в реальности, физически бесконечно большое расстояние — это расстояние, которое много больше начального. Ну, например, если  $R_0 = 1$  м, то бесконечностью для нас будет уже

\* Позже мы увидим, что  $k$  зависит только от выбранной системы единиц.

\*\* Коэффициент  $k$  имеет свою размерность, но сейчас она нас не интересует.



расстояние в 10 м между электронами. Т.е. если мы произведём такой эксперимент и измерим скорость электронов на расстоянии  $R = 10$  м, то она окажется очень близка к 16 м/с.

Для произвольного расстояния  $R$  между разлётающимися электронами справедливо:

$$kq^2/R + 2mv^2/2 = E_0 - \text{начальная энергия системы}$$

**Вопрос 90:** Как учесть в предыдущей задаче энергию гравитационного притяжения шаров друг к другу?

**Ответ 90:** Нет ничего проще — добавим в начальную энергию системы шаров слагаемое  $\Upsilon m^2/R$ , а в конечную энергию ничего добавлять не нужно, потому что на бесконечности эта энергия, как и кулоновская, будет равна нулю (и там, и там появляется бесконечность в знаменателе). Поэтому будем иметь такое равенство:

$$kq^2/R_0 + \Upsilon m^2/R_0 = 2mv^2/2.$$

**И всё было бы замечательно,**

### 11.3 ЕСЛИ БЫ ЭТО БЫЛО ПРАВДОЙ

Но посмотрим внимательно на полученное выражение. Из него получается, что чем больше, сильнее гравитационное ПРИТЯЖЕНИЕ между телами, тем БОЛЬШЕ их конечные скорости! Но ведь должно быть наоборот — притяжение тел может только препятствовать их разлёту. Т.е. добавка  $E_{\text{гр}}$  к начальной кулоновской энергии должна УМЕНЬШАТЬ начальную энергию, а соответственно и скорости разлёта. Вот если бы гравитация носила характер отталкивания — тогда всё было бы в порядке — она увеличила бы скорости частиц.

Что же получается: выходит, что потенциальная энергия притяжения и потенциальная энергия отталкивания одних и тех же частиц должны отличаться друг от друга? Чем? **Вспомним** формулу кулоновской энергии:  $E_{\text{эл}} = kq_1q_2/R$ , причём, отталкивание у нас будет, если  $q_1$  и  $q_2$  — одного знака, т.е. если они при перемножении дают плюс, а притяжению соответствуют заряды разных знаков, их произведение будет отрицательно. В итоге получается, что для кулоновской энергии притяжение описывается отрицательной потенциальной энергией, а отталкивание — положительной.

Теперь понятно, где мы ошиблись с гравитационной энергией — **поскольку гравитация — всегда притяжение, то  $E_{\text{гр}}$  должна быть отрицательной:**

$$E_{\text{гр}} = -\Upsilon m_1m_2/R$$

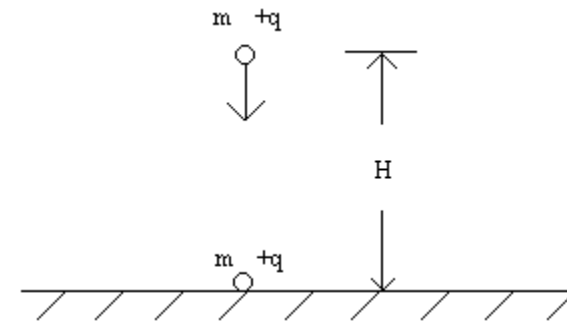
А закон сохранения для пары заряженных частиц должен выглядеть так:

$$kq^2/R - \Upsilon m^2/R = 2mv^2/2$$

**Запомним : отталкивание  $\rightarrow E_{\text{н}} > 0$  ,  
притяжение  $\rightarrow E_{\text{н}} < 0$**

Заметим, что отрицательность  $E_{\text{гр}}$  только усиливает недоумение: как же может энергия тела, поднятого над землёй, быть равной  $mgh$ ? Но об этом чуть позже.

**Вопрос 91:** Система из двух одинаковых заряженных материальных точек расположена так:



Первоначально они неподвижны, а потом верхнее тело отпускают. На какое минимальное расстояние  $h$  смогут сблизиться заряды?

**Ответ 91:** Очевидно, в этой задаче «замешаны» следующие энергии — электрическая, гравитационная энергия тела над землёй, возможно, кинетическая. Скорее всего, энергией гравитационного взаимодействия двух масс  $m$  можно пренебречь.\*

Тогда по закону сохранения энергии для начального момента и для момента максимального сближения тел (когда расстояние между ними  $h$ ):

$$mgH + k(q^2/H) = mgh + k(q^2)/h$$

Мы учли, что расстояние между телами будет минимальным в тот момент, когда скорость верхнего тела под влиянием кулоновского отталкивания частиц станет нулевой. Из полученного равенства можно найти интересное нас расстояние  $h$ :

\* Почему? Потому что масса Земли много больше масс частиц.

$mgH - mgh = kq^2/h - kq^2/H$  или  $mg(H - h) = kq^2(H - h)/(Hh)$ ,  
или  $h = kq^2/(mgH)$ . Это и есть ответ.

**Вопрос 92:** Проверьте ответ предыдущей задачи по размерности и на предельном случае.

**Ответ 92:** При больших  $H$  расстояние  $h$  будет мало, как и положено (кулоновское взаимодействие много слабее гравитационного). А при малых начальных высотах  $H$  расстояние  $h$  будет очень большим — только так можно скомпенсировать сильное начальное взаимодействие зарядов.

## 12. УПРУГАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

### 12.1. ПОЛУЧИМ ФОРМУЛУ

...для потенциальной энергии *упругого* взаимодействия. Для определённости пусть у нас есть пружина, которую мы *слегка* сжали.\* В результате пружина приобрела способность что-то сделать — сдвинуть тело, щёлкнуть по лбу и т. д. — пружина приобрела потенциальную энергию. Понятно, что величина этой энергии должна зависеть от величины того, на сколько мы деформировали пружину (т. е. от разницы между длиной деформированной и недеформированной пружины  $\Delta l = l - l_0$ ). Обратите внимание, что и при сжатии пружины (т. е. при  $\Delta l < 0$ ), и при её растяжении (при  $\Delta l > 0$ ) энергия пружины растёт. Поэтому энергия  $E_{\text{упр}}$  не может быть пропорциональна  $\Delta l$ . Она должна быть пропорциональна чётной степени  $\Delta l$ .

**Вопрос 93:** Почему?

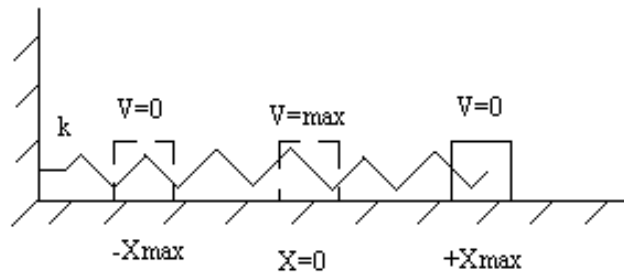
Итак, у нас есть основание считать, что  $E_{\text{упр}} \sim (\Delta l)^2$ . Кроме того, эта энергия должна зависеть от качества пружины — тугая она или мягкая. Введём соответствующую величину  $k$  и назовем её «коэффициент упругости» или просто «упругость». Величина  $k$  будет отвечать сразу за много параметров пружины — её материал, диаметр витков, длину в недеформированном состоянии. Но мы не будем разбираться во всей этой кухне, а просто будем считать, что у каждой пружины есть свой коэффициент упругости  $k$ , показывающий степень «энергетического отклика» данной пружины на некоторое стандартное сжатие.

В итоге можно предположить, что  $E_{\text{упр}} \sim k(\Delta l)^2$ .

В дальнейшем мы увидим, что на самом деле  $E_{\text{упр}} = k(\Delta l)^2/2$ , а пока мы будем просто пользоваться этой формулой.

\* Если мы слишком сильно сожмём (или растянем) пружину, то у нас будут большие сложности с описанием её поведения. Все наши выводы будут справедливы лишь для таких сжатий (деформаций), которые много меньше длины пружины в недеформированном состоянии. О причинах этого мы кое-что скажем в разговоре о взаимодействии молекул между собой.

## 12.2. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ПРУЖИНА: ПЕРЕХОДЫ ЭНЕРГИИ



Кубик на пружине

Пусть один конец горизонтальной пружины прикреплен к вертикальной стенке, а ко второму прикреплен кубик массой  $m$ , который может скользить практически без трения вдоль оси пружины жёсткости  $k$ . Кубик отводят на расстояние  $x_0$  и отпускают. Как он будет двигаться?

Напишем закон сохранения энергии для кубика:

$$kx_0^2/2 = kx^2/2 + mv^2/2, \quad (*)$$

где слева стоит начальная энергия кубика — она чисто потенциальная, упругая, кинетической нет — кубик неподвижен; а справа — его энергия в произвольный момент времени — она может быть отчасти потенциальной (упругой), отчасти кинетической.

Проанализируем записанное равенство. Из него видно, что в тот момент времени, когда  $x = 0$ , скорость кубика  $v$  максимальна и равна  $v = (\sqrt{k/m}) x_0$ . Из рисунка видно, что это будет при прохождении кубиком равновесного положения (пружина не деформирована). После этого кубик будет двигаться дальше вправо, до того момента, пока растяжение пружины не станет снова равным  $x_0$ . Тогда кубик замрёт:  $v = 0$  в соответствии с законом сохранения энергии. Потом он двинется обратно через равновесное положение пружины к своему начальному положению — возникнут колебания. Реально, конечно, энергия кубика будет постепенно убывать (за счет потерь на трение, сопротивление воздуха...). Можно даже нарисовать график зависимости скорости кубика  $v$  от его координаты  $x$ .

В соответствии с законом сохранения (\*) график будет иметь примерно такой вид:



**Вопрос 94:** На каком расстоянии от равновесного (деформации пружины нет) положения скорость кубика массы  $m$  уменьшится в три раза по сравнению с его скоростью  $v_0$  в равновесном положении?

**Ответ 94:**  $kx^2/2 + m(v_0/3)^2/2 = mv_0^2/2$  или  $kx^2 + mv_0^2/9 = mv_0^2$  или  $kx^2 = (8/9)mv_0^2$  или  $x = \sqrt{(8m/9k)}v_0$ . Далеко ли это от точки максимального отклонения кубика? Так как  $mv_0^2/2 = kx_0^2/2$ , то  $v_0 = \sqrt{(k/m)}x_0$ . Поэтому скорость уменьшится в три раза в точке  $x = \sqrt{(8/9)}x_0 \approx 0,93x_0$ , т.е. не так далеко от точки крайнего растяжения пружины.

**Вопрос 95:** Постройте зависимость квадрата скорости кубика  $v^2$  от квадрата его смещения относительно равновесного положения  $x^2$ .

**Вопрос 96:** Оцените, какую жёсткость « $k$ » должна иметь резина рогатки, чтобы камешек, пущенный из этой рогатки, мог достичь высоты десятиэтажного дома.

**Ответ 96:** Когда мы **ОЦЕНИВАЕМ** какую-то величину, то, во-первых, мы выбираем некоторые параметры задачи, исходя из общих разумных соображений. Например, в данном случае примем растяжение рогатки  $x = 10$  см. Кроме того, часто определяют оцениваемую величину приблизительно, с точностью до порядка.\* Ведь всё равно мы выбираем ряд параметров задачи произвольно (можно было взять  $x = 15$  см или  $x = 5$  см). Оттянув рогатку на 10 см и отпустив камешек, мы передали ему упругую энергию  $E = k(0,1)^2/2$ , а точнее в два раза больше, потому что у рогатки одновременно растягиваются две параллельные резинки (см. рис.). Поэтому  $E = k \times 0,01$  Дж. Эта энергия переходит сначала в кинетическую

\* См. сноску к ответу 71.

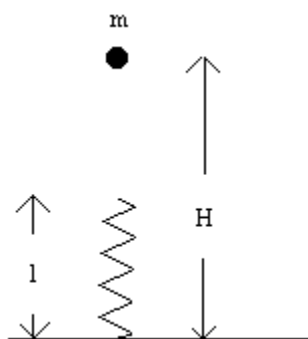
энергию камня, а потом, в высшей точке его полёта, в потенциальную энергию  $mg h^*$ , где  $m$  — масса камня,  $h$  — высота дома. Примем  $m = 50$  г,  $h = 30$  м, тогда  $k \times 10^{-2} = 0,05 \times 10 \times 30$ . Напомним, что  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>. Отсюда  $k = 1500$  (единиц упругости в нашей системе единиц). Много это или мало? Загляните в справочник.

Зачем мы столько возимся с этой пружиной и кубиком? Неужели реальная жизнь полна пружин и кубиков? В некотором смысле — да, полна. Это молекулы (самая распространённая модель молекулы — шарики-атомы, соединённые пружинками). Такая модель вполне реалистично описывает основные черты взаимодействия атомов в молекуле — отталкивание при попытке сблизить их и притяжение при попытке разойтись на расстояние больше равновесного.

**Вопрос 97:** Шарик массы  $m$  падает с высоты  $H$  на пружину жёсткости  $k$  и длиной  $l$ . Опишите дальнейшее поведение шарика.

**Ответ 97:** Что значит описать поведение шарика? Это значит проследить его положение (и желательна скорость) и обосновать свои выводы ссылками на законы физики и логики. Очевидно, основной инструмент решения — закон сохранения энергии. Какие энергии следует учесть? Потенциальную энергию шарика над землёй, упругую энергию пружины, кинетическую энергию шарика.

Сделаем соответствующий рисунок:



Итак, неподвижный шарик на высоте  $H$  взаимодействует только с Землёй и потому обладает потенциальной энергией  $mgH$  (если принять её на уровне земли за ноль). Начинается падение, уменьшается гравитационная потенциальная энергия шарика,

соответственно растёт его кинетическая энергия  $mv^2/2$ , их сумма продолжает быть равной начальной энергии шарика:  $mgH = mgh + mv^2/2$  ( $h$  — высота шарика в данный момент). Так будет продолжаться до момента встречи шарика с концом пружины, т. е. до высоты  $l$  над землёй. С момента их встречи часть энергии налетевшего шарика будет тратиться на сжатие пружины, иначе говоря, передаваться пружине в виде её упругой энергии. Баланс энергий в этот период времени будет таким:

$$mgH = mgh + mv^2/2 + kx^2/2,$$

где  $h$  — высота шара над землёй,  $v$  — его скорость,  $k$  — жёсткость пружины, а  $x$  — её деформация.

Или с учётом обозначений

$$mgH = mg(l - x) + kx^2/2 + mv^2/2.$$

Это будет продолжаться до тех пор, пока упругость пружины не затормозит шарик настолько, что он остановится ( $v = 0$ ). В этот момент  $mgH = mg(l - x_1) + kx_1^2/2$ , где  $x_1$  — величина деформации пружины в тот момент, когда шарик остановится. При этом высота шарика над землёй будет  $h = l - x_1$ . После этого пружина с шариком пойдёт вверх. И вроде бы всё будет повторяться в обратной последовательности: пружина распрямляется, поднимая шарик и увеличивая его скорость. Когда конец пружины (и шарик) окажется на расстоянии  $l$  от земли, пружина снова станет недеформированной, т. е. уже не будет обладать потенциальной энергией. Энергия вся уже вернется к шарiku. Вся — значит  $mgH$ . Поэтому на высоте  $l$  скорость шарика (на пути вверх) будет та же, что и на пути вниз, т. е. в момент встречи с пружиной:  $mv_0^2/2 + mgl = mgH$  — из этого уравнения можно определить скорость шарика  $v_0$  в момент встречи с пружиной и в момент расставания с ней на пути вверх. Расставания — потому что на высоте  $l$  шарик перестанет подпираться пружиной. Её конец не моментально остановится в точке  $l$  над землёй, но всё-таки отстанет от шарика. А шарик, разумеется, взлетит на начальную высоту  $H$ . Конечно, в пренебрежении потерями энергии на сопротивление среды, нагрев пружины и т. д.

**Вопрос 98:** Постройте зависимость скорости шарика от его положения над землёй.

\* Если мы стреляем вертикально вверх.

## 13. ПРИНЦИП МИНИМУМА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Что бы могли значить слова, стоящие в заголовке этого параграфа?

Принцип в физике — обычно некоторое утверждение. Иногда оно следует только из опыта, иногда является логическим или математическим следствием более общих утверждений (законов, постулатов, определений). В данном случае речь идёт о ситуации, в которой тело имеет наименьшую (из возможных) потенциальную энергию. Видимо, такая ситуация, такое состояние, такое положение тела чем-то выделяется, имеет какие-то особенности. Посмотрим несколько примеров с участием известных нам видов потенциальной энергии.

### 13.1. МЫСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Вот три ситуации:



Три однотипных ситуации

Во всех случаях изначально тела находятся в ситуации, когда их приходится удерживать от движения: шарик на стенке ямки «хотел бы» упасть на её дно, пружина «желала бы» разжаться, а одноимённые заряды — разбежаться на возможно большее расстояние. Если им предоставить такую возможность, т. е. предоставить самим себе, — они так и сделают. Но обратите внимание:

*при этом все они уменьшат свою потенциальную энергию до минимально возможного значения.*

Похоже, что

**любое тело само по себе стремится перейти в состояние с минимальной потенциальной энергией.**

Такое впечатление, что все тела в физике подобны напряженно работающим людям — придя домой, мы тоже стремимся принять положение с минимальной потенциальной энергией — прилечь (если нам не мешают).

Итак, **принцип:** *тело, предоставленное самому себе, стремится перейти в состояние с минимально возможной потенциальной энергией.*

### 13.2. ОБСУЖДЕНИЕ

Во-первых, заметим, что необычен сам факт того, что неживое тело (шарик, пружина, заряд) к чему-то «стремится». До сих пор мы с этим вроде бы не сталкивались? Нет, если подумать, то сталкивались, да ещё как! Разве закон сохранения энергии это не *стремление* тела (системы тел) сохранять свою энергию? Просто в случае с потенциальной энергией это стремление очень просто увидеть. И такие «стремления» у нас будут ещё не раз — стремление тела сохранять свою скорость (инерция тел), стремление сделать поменьше поверхность раздела двух сред и т. д. И каждый раз, естественно, это будет связано с каким-то законом или принципом.

Второе, что бросается в глаза: состоянию с минимальной энергией соответствует *состояние* покоя или, иначе говоря, **равновесия тела**.

В самом деле, если шарик находится на склоне ямки, то предоставленный себе, он куда-то двинется (вниз по склону), а расположившись на дне, он такого желания не проявляет. Кстати, реально любой склон создает трение, а любая среда — сопротивление движению, поэтому реально любой шарик не будет бесконечно кататься со склона на склон, а постепенно будет уменьшать свою скорость и, в конце концов, уляжется на дно.

### 13.3. ОБОСНОВАНИЕ

Откуда всё-таки следует принцип минимума потенциальной энергии? Пока мы ссылались лишь на очевидные эксперименты. Но попробуем немного порассуждать. Пусть шарик неподвижно лежит на дне ямки. Предположим, он почему-то «решил» двинуться из этого положения. Для этого ему нужно хоть чуть-

чуть *увеличить* свою кинетическую энергию — от нуля до положительной величины  $mv(2)/2$ . Но тогда по закону сохранения энергии должна *уменьшиться* его потенциальная энергия, ведь сумма  $E_k + E_n$  для шарика постоянна (мы предположили, что шарик САМ пытается покинуть дно). Но его потенциальная энергия и так минимально возможная! Значит: наше предположение, что шарик может сам по себе покинуть положение равновесия, противоречит закону сохранения энергии.

Чем может быть **полезен** нам такой принцип? Объяснением того, что происходит и, что ещё важнее, предсказанием того, что произойдёт в определённой ситуации. Постараемся сразу проиллюстрировать это.

## 14. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ КРИВАЯ

Мы уже неоднократно убеждались, что **картинки в физике крайне полезны**. Только что мы начали разговор о принципе минимума потенциальной энергии с рассмотрения трёх картинок, а потом пришли к выводу, что всё это следствие сохранения энергии. *Одна из самых полезных физических картинок называется потенциальной кривой*. Это просто график зависимости  $E_n$  тела от его положения (координаты).

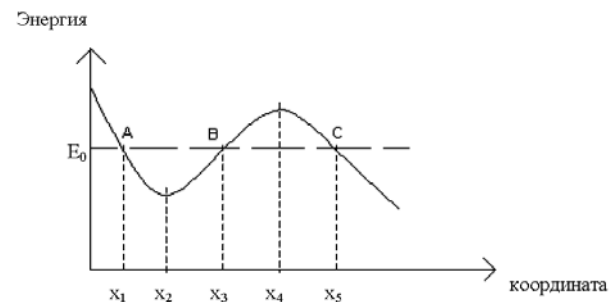
Откуда берётся потенциальная кривая? Чаще всего из эксперимента, но в отдельных (более простых) случаях это может быть результатом расчётов.

Вот простой **пример** — график зависимости  $E_n$  тела, поднятого над землёй, от его высоты:



Естественно, это просто прямая линия в соответствии с известной зависимостью  $E_n = mgx$  (здесь  $x$  — координата тела, ось  $X$  направлена вверх).

Рассмотрим более общий (и интересный) случай:



Потенциальная кривая как источник информации о поведении частицы

Что можно сказать о поведении частицы с такой потенциальной кривой?

Ну, во-первых, сразу видно, что в точке  $x_2$  тело может находиться в равновесии (в покое). Почему может, а не точно будет? Потому что это зависит от её кинетической энергии, о которой здесь (на графике) ничего не сказано.

Во-вторых, обратимся к точке максимума потенциальной кривой ( $\times 4$ ). Она тоже соответствует возможному положению равновесия тела. Аналогия: шарик может быть в покое не только на дне ямки, но и на самой вершине холма. Правда, в последнем случае шарик будет в **неустойчивом** равновесии (а на дне — в **устойчивом**). Иными словами, если при небольшом смещении из состояния равновесия тело стремится вернуться обратно, то это равновесие называется (и справедливо) устойчивым, а если стремится уйти ещё дальше от равновесия, то неустойчивым.

**Вопрос 99:** Почему речь шла именно о *небольшом* смещении из положения равновесия?

**Ответ 99:** Потому что при большом удалении частицы от точки равновесия поведение тела уже не зависит от ситуации в точке равновесия. Представьте, что мы взяли шарик со дна явной ямки и положили себе в карман. Шарик не выкажет стремления вернуться в ямку, хотя он и был в устойчивом равновесии.

**Вопрос 100:** Возможна ситуация, когда тело находится в равновесии, но оно не является ни устойчивым, ни неустойчивым. Что это за ситуация?

**Ответ 100:** Например, шарик на плоскости. Выведенный из равновесия он не собирается ни возвращаться обратно, ни уходить ещё дальше. Это так называемое **безразличное** равновесие.

Итак, нам известно, что если, например, частица находится в точке с координатой  $x_1$ , то она обязательно будет иметь потенциальную энергию  $E_{п0}$  (см. график). Но для нас важнее обратное утверждение: если у тела  $E_{п} = E_0$ , то оно может находиться лишь в точке  $x_1$  (и  $x_3$  тоже!). Посмотрим, что из этого (а также, как водится, из закона сохранения энергии) следует.

Сначала о законе сохранения. Для изолированной (от внешней подкачки энергии) частицы справедливо:  $E_{п} + E_{к} =$  постоянная величина. Обозначим эту постоянную через  $E_0$ . Тогда  $E_0 - E_{п} = E_{к} = mv^2/2$ . Очевидно, что  $E_{к}$  — неотрицательная величина. Поэтому  $E_0 \geq E_{п}$ .

Осознаем смысл последнего неравенства: **для любого тела обязательно** его суммарная энергия должна быть не меньше его потенциальной энергии. Тривиально, не правда ли? Но вот какие нетривиальные следствия мы отсюда имеем.

Пусть наша частица имеет суммарную энергию  $E_0$  (например, 10 Дж). Нанесём её пунктиром на график с потенциальной кривой этой частицы. Обозначим точки их пересечения соответственно через А, В и С. Видно, что левее точки А потенциальная кривая идёт выше пунктира, т. е. в этой области  $E_{п} > E_0$ . Но ведь мы установили, что это невозможно — должно быть наоборот:  $E_0 \geq E_{п}$ . Какой вывод можно сделать? В области левее точки А частица быть не может! И в области между В и С тоже не может. А вот между А и В и правее точки С — пожалуйста.

Итак, потенциальная кривая подсказывает нам, где может находиться частица с данной энергией, а где нет. Но это ещё не всё.

Что можно сказать о поведении частицы в точках А и В? В них  $E_{п} = E_0$ , отсюда  $E_{к} = 0$ , т. е. в этих точках скорость частицы будет нулевой. Только в этих точках при данной энергии частица может быть неподвижной. И предсказала это нам потенциальная кривая.

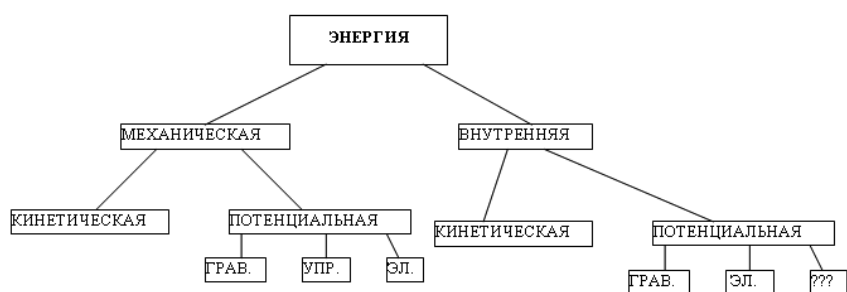
Но продолжим получение полезной информации. Где частица будет иметь наибольшую скорость? Там, где она будет иметь наибольшую кинетическую энергию. Или — по закону сохранения энергии — там, где она будет иметь наименьшую потенциальную энергию. Т. е. в точке с координатами  $x_2$ .\*

В заключение повторим **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**:

- если система тел предоставлена самой себе, то она стремится прийти в состояние с минимально возможной потенциальной энергией;
- потенциальная кривая может дать очень много полезной информации о возможном движении и состоянии тела;
- минимум потенциальной кривой соответствует устойчивому равновесию тела, а
- максимум на потенциальной кривой — неустойчивому равновесию.

\* Область потенциальной кривой в районе её минимума часто называют **потенциальной ямой**, а в районе максимума — **потенциальным барьером**. Смысл этих терминов понятен: чтобы вырваться из ямы, нужна энергия, равная глубине этой ямы (в джоулях), а энергетический барьер — препятствие для передвижения частицы.

## 15. ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОвого ДВИЖЕНИЯ (ПЕРВЫЙ ВЗГЛЯД СВЕРХУ)



(Вопросительные знаки напоминают нам, что мы знаем про энергию многое, но не всё).

### 15.1. ЧТО ТАКОЕ ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ

Мы уже изрядно прошлись по этой схеме. Сейчас нас будет интересовать такой вопрос: где в ней таится тепловая энергия. Какой из известных нам видов энергии отвечает за теплоту? Ну, хотя бы так: внешняя (механическая) или внутренняя?

Давайте действовать методом исключения. Прежде всего, отбросим из списка претендентов *внешнюю кинетическую* энергию — даже у сильно нагретого неподвижного кирпича нет кинетической энергии. А тепловая явно есть.

И *внешнюю потенциальную* энергию, видимо, можно не подозревать в сокрытии теплоты — даже отдельно взятое тело (никак не расположенное по отношению к другим) может быть нагрето и, стало быть, может обладать интересующей нас энергией. Ещё можно попытаться представить себе кирпич, поднятый на второй этаж и от этого ставший теплее. Представить можно, наблюдать — нет.

Итак, осталась *внутренняя* энергия. Напомним, что в соответствии с атомной гипотезой все тела состоят из множества микротел (атомов и молекул). Внутренняя энергия — это и есть энергия этих микрочастиц — энергия их движения и их взаимодействия друг с другом. Наша-то энергия, какая — кинетическая или потенциальная?

Пусть потенциальная, то есть энергия взаимодействия молекул (на расстоянии!) между собой. Вдумаемся в смысл слов: тепловое взаимодействие молекул. Получается, что в зависимости от расстояния между ними тело будет теплее или прохладнее. Иначе говоря, чем плотнее, тем теплее?! Ну, например: при прочих равных лёд *должен быть теплее снега*?! Ну, уж нет! Похоже, у нас остался единственный подозреваемый — энергия движения микрочастиц. Обратите внимание — подозреваемый, но не осуждённый. А судьи кто? В физике верховный судья — это опыт, эксперимент. **Нельзя все закономерности окружающего нас мира вывести исключительно из логических размышлений.** Обязательно в какой-то момент вы будете вынуждены обратиться к эксперименту. Рассуждения до эксперимента — это, по сути дела, попытка понять, какой именно эксперимент должен быть поставлен. Рассуждения после него — это обсуждение результата эксперимента.

Какого? Вряд ли нам удастся увидеть сами движущиеся молекулы,\* но нам это и не нужно. Требуются лишь свидетели-факты, говорящие про их существование. (Чтобы убедиться в существовании рейса самолета Нью-Йорк — Чикаго компании TBS в 10:30 утра, не обязательно ехать в аэропорт Джона Кеннеди. Можно просто позвонить в справочную службу. Или — своему знакомому, который регулярно летает в Чикаго самолетами этой компании.) Если необходимые факты есть в природе, то **наблюдения** рано или поздно натолкнут людей на них.

В 1827 году Роберт Броун рассматривал в очень простой, самодельный микроскоп цветочную пыльцу в воде. Он с удивлением заметил, что крошечные частички пыльцы непрерывно движутся! И не из-за каких-то очень слабых потоков воды, а так, как будто они (частички) живые. Броун даже решил, что он открыл новое проявление жизни.

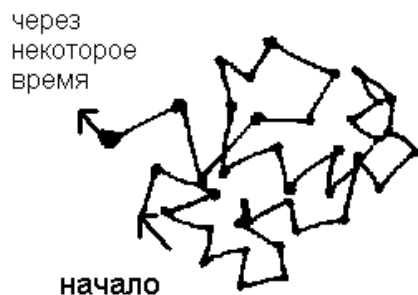
**Вопрос 101:** Как можно было бы проверить гипотезу Броуна: наблюдаемое движение — результат усилий самих живых частиц?

\* Это стало возможным после изобретения в 1951 г. ионного микроскопа. Первые фотографии атомов (в виде отдельных точек) были получены в начале 60-х годов.



**Ответ 101:** Сам Броун поступил так: взял очень маленькие кусочки явно неживой среды — глины. И с удивлением (и досадой!) обнаружил то же самое движение.

Вот как примерно выглядела картина броуновского движения частиц.



Точки — это последовательные положения какой-то одной частицы.

Разумеется, броуновские частицы слишком велики, чтобы быть молекулами. Каждая из них состояла примерно из  $10^{10}$  атомов. Но эти частицы подвергаются непрерывной бомбардировке со стороны отдельных молекул воды, то с одной стороны, то с другой. В результате броуновские частицы непрерывно движутся так, как показано на рисунке.

Такое непрерывное и хаотическое движение броуновских частиц и свидетельствует о непрерывном и хаотическом движении отдельных молекул. Картинка движения отдельной молекулы (воды) отличается от движения броуновской частицы лишь длиной отрезков, соединяющих отдельные точки картины — расстояниями, проходимыми от одного столкновения (с другой молекулой, со стенкой) до другого.

Итак, в нашем случае всё — и логика, и опыты — говорит за то, что **тепловая энергия тела — это энергия движения его микрочастиц.**

**Вопрос 102:** Всё ли в порядке в выражении «броуновское движение молекул»?

**Ответ 102:** Конечно же — броуновское движение ЧАСТИЦ (а не молекул!).

**Вопрос 103:** Возьмём кружку с чаем и пойдём с ней (или даже побежим). Тем самым мы увеличиваем скорость молекул чая, и он должен нагреться.

Но наш опыт говорит, что вряд ли это произойдёт (скорее наоборот). В чём же дело?

**Ответ 103:** Когда говорят о движении микрочастиц (или иначе о **тепловом** движении), имеют в виду не движение *вместе* со всем телом, а их индивидуальное движение *внутри* тела. При пробежке с чаем возросла внешняя (механическая) энергия чая, а его внутренняя энергия (энергия молекул и атомов) не изменилась. Значит, не изменилась и тепловая энергия чая.

**Вопрос 104:** Что вы скажете о таком утверждении: то, что тепловая энергия действительно существует, следует из закона сохранения энергии?

**Ответ 104:** Истинная правда. Возьмём какое-то тело и, не меняя его скорости (как целого), не меняя его положения, просто его нагреем. В результате у тела появятся новые энергетические возможности (воздушный шар сможет взлететь, водяной пар приподнимет крышку кастрюли и т.д.). А ведь уже известная нам внешняя энергия тела не изменилась.

Значит, или энергия может возникать из ничего (что не подтверждается опытами), или при нагреве мы сообщили телу какую-то внутреннюю энергию — в данном случае *тепловую*.

## 15.2. КАРТИНА ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ (ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ)

Вы наверно замечали, что очень высокие люди ведут себя немножко иначе, чем остальные (как минимум, опасаются задеть головой косяк двери). Человек, одетый в спортивный костюм, ведёт себя не так, как если бы на нём был смокинг.\* Опытный официант легко отличит по движениям одинокого посетителя ресторана от того, кто ждёт своего друга.

Какие *особенности молекул* определяют их поведение?

Отметим четыре момента:

- молекулы очень маленькие,
- в любом теле их очень много,
- они взаимодействуют друг с другом,
- они непрерывно и хаотично двигаются.

\* Знаете ли вы, чем отличается фрак от смокинга? (В детстве меня очень интересовал этот вопрос.)

Проследим последовательно за этими особенностями и, отталкиваясь от них, попробуем выстроить интересующую нас картину.\*

### 15.3. ЧТО ЗНАЧИТ: «МОЛЕКУЛЫ — ОЧЕНЬ МАЛЕНЬКИЕ»?

Ну, например, размер молекул *воздуха* (в основном это молекулы азота или кислорода) примерно  $4 \times 10^{-8}$  см.\*\* Если бы вдруг по волшебству вы стали размером во всю нашу Землю, то молекула стала бы размером с маленькую мышку (не с комара, а с *мышку!*).

**Вопрос 105:** Покажите, что это действительно так. Воспользуйтесь значением радиуса Земли. Для оценки естественно считать, что ваш рост порядка 1 м. Понятно, что вы значительно выше, но для оценки достаточно и такой точности, ведь радиус Земли тоже не в точности равен 6400 км.

Если это так, то молекулы, конечно, малы по сравнению с привычными для нас размерами (метрами, миллиметрами, километрами). А по сравнению с расстояниями между молекулами? (Понятно, что речь идёт о **среднем** расстоянии, ведь молекулы непрерывно движутся.) Насколько тесно живут молекулы в своем коллективе — как в городе или как на далёкой ферме? Город, фер-

\* Строго говоря, микрочастицы имеют свои законы поведения, весьма непривычные для нас, проводящих время (с их точки зрения) в мире гулливеров. Но оказывается, что это существует лишь в тех ситуациях, когда «сцена», на которой выступает микрочастица, тоже очень мала. Грубо говоря, при пролёте частицы через окно в стене она (частица) никаких странностей в своем поведении не обнаружит (полетит так же, как маленький мячик). А если дырка (окно) достаточно мала, то ждите неожиданностей (с точки зрения Гулливера, конечно): пролетая через дырку, «мячик» может на мгновение превратиться в «облачко», а потом, уже пролетев, снова «собраться» в «мячик». Похоже на сказку, не правда ли? Мы вернёмся к ней (сказке) «перед сном» — в последней части нашего курса. Заметим лишь, что очень многие физические проблемы можно решить без учёта этих эффектов. (Длина волос может быть важной при выборе на роль в рекламном ролике или для результата пловца, но абсолютно несущественна при приёме на работу программиста, при игре в шахматы, да и во многих других ситуациях.)

\*\* Встречаются и гораздо более солидные молекулы. Обычно они участвуют в химических или биологических процессах (полимеры, белки). Иногда это цепочки из сотен тысяч и даже миллионов атомов в одной молекуле. (Напомним, что типичный размер одного атома  $10^{-8}$  см.) Но это экзотика. Наше (физическое) внимание будет сосредоточено на гораздо более простых объектах — молекулах, состоящих из одного-двух-трёх атомов.

ма — это ещё мало о чём говорит. Можно жить в городе в одиночку в громадной квартире и ютиться в тесноте на ферме — трое детей в одной маленькой комнате. В конце концов, это может зависеть от Вашего финансового *состояния*.

### 15.4. ТАК ЖЕ И У МОЛЕКУЛ

Нетрудно сообразить, что степень близости молекул зависит от состояния тела — твёрдое оно, жидкое или газообразное. Ведь и лёд, и вода, и водяной пар состоят из одних и тех же молекул. Но лёд — твёрдый, он старается сохранить свою форму и свой объём. Вода более сговорчивая, она легко соглашается с формой, которую задаёт ей сосуд, но упорствует по поводу своего объёма. Наиболее подвижен газ — он согласен на всё и заполняет предоставленное ему пространство, не имея ни собственной формы, ни объёма. С чем это может быть связано? Видимо, разные состояния тел (твёрдое, жидкое, газообразное) отличаются разным **взаимодействием молекул**.

Разные состояния — разная энергия взаимодействия молекул.

Итак, чтобы оценить расстояния между молекулами, нам нужно выбрать что-то определённое — или твёрдое тело, или жидкость, или...

Что разумнее? Вспомним, что нас интересует собственно *тепловое движение*. За него «отвечает» внутренняя кинетическая энергия. Значит, имеет смысл выбрать то состояние (из трёх возможных), в котором  $E_k$  молекул проявляется наиболее ярко, где она не будет заслоняться другой энергией.

**Вопрос 106:** Какой другой?

**Ответ 106:** Потенциальной энергией взаимодействия молекул.

Очевидно, если уж пренебрегать энергией взаимодействия молекул, то лучше это делать для газа.

**Вопрос 107:** А если для твёрдого тела?

**Ответ 107:** Это будет хуже всего. Точнее, это (пренебрегать энергией взаимодействия молекул в твёрдом теле) вообще нельзя делать!

...Для молекулы газа  $\langle E_k \rangle$  много больше  $\langle E_n \rangle$  ... (\*)

(Здесь значок  $\langle \rangle$  означает «среднее значение», ведь во время движения энергия молекул всё время меняется — в результате столкновений.)

Поэтому далее имеет смысл анализировать поведение именно молекул газа.

Обратите внимание, что, имея дело с газом, мы избавлены от массы сложностей, связанных с энергией взаимодействия молекул (вид зависимости?, учёт переменного расстояния?, сколько молекул-соседей учитывать?). Потому что для газов можно пренебречь величиной энергии взаимодействия (см. (\*)).

**Вопрос 108:** Значит ли это, что можно считать молекулы газа вообще не взаимодействующими друг с другом?

**Ответ 108:** Можно считать, что молекулы не взаимодействуют на расстояниях, но остаются столкновения молекул. В них происходит передача энергии от одной молекулы к другой. Кроме того, можно представить себе передачу энергии от молекулы к молекуле через их столкновения со стенками сосуда.

## 15.5. ПЛОТНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ

Экспериментальный результат: в  $1 \text{ см}^3$  воздуха в классе приблизительно  $2,5 \times 10^{19}$  молекул. Есть опасение, что даже такие большие числа вас уже не впечатляют. Тем не менее... Возьмём столько планет, сколько людей проживает сегодня на всей Земле, и заселим каждую планету так, как заселена наша Земля сегодня. Так вот: общее количество всех этих людей на всех планетах будет примерно равно числу молекул воздуха в кубике со стороной  $1 \text{ см}$ .

**Вопрос 109:** Оцените — сколько кубических сантиметров воды во всех земных океанах.\*

**Ответ 109:** План наших действий такой — просто умножить площадь поверхности океана  $S$  на его среднюю глубину  $H$ . (Если вы не знаете никаких формул для подсчёта объёмов — не беда. Согласитесь, что площадь поверхности океана и его глубина полностью определяют его объём. А по размерности объёма  $V$  (метры в кубе) ясно, что  $V = SH$ .)

Будем считать, что  $S$  по порядку величины равна площади всей поверхности Земли (известно, что они отличаются менее чем в два раза).

\* Неужели даже это можно сосчитать, не вычерпывая море ведром за ведром? Можно! Физики всё могут (шутка).

Земля — практически шар. Как найти площадь поверхности шара? Она полностью определяется радиусом шара. В самом деле, попробуйте сделать два разных шара с одним и тем же радиусом. Поэтому величина  $S$  может зависеть только от радиуса Земли  $R$ . Так как размерность  $S$  будет  $\text{м}^2$ , то и зависимость  $S$  от  $R$  будет квадратичной:  $S = kR^2$ . Для оценки примем коэффициент  $k = 1$  (на самом деле  $k \cong 12$ ).

Значение радиуса Земли нам уже известно:  $R = 6400 \text{ км} = 6,4 \times 10^3 \text{ км} = 6,4 \times 10^6 \text{ м}$ . Поэтому

$S = R^2 \approx 40 \times (10^{12}) = 4 \times 10^{13} \text{ м}^2$ . Среднюю глубину океана примем  $H = 5 \text{ км} = 5 \times 10^3 \text{ м}$ . Тогда объём всей океанской воды получается  $V = SH = 4 \times 10^{13} \times 5 \times 10^3 = 2 \times 10^{17} \text{ м}^3 = 2 \times 10^{17} \times 10^6 = 2 \times 10^{23} \text{ см}^3$ .

Итак, по нашей оценке во всех земных океанах примерно  $2 \times 10^{23} \text{ см}^3$  воды. Интересно, что это чуть меньше числа молекул воды в одном кубическом сантиметре.

Если в комнате площадью  $10 \text{ м} \times 10 \text{ м} = 100 \text{ м}^2$  находится 200 человек (это журналисты, ожидающие завершения переговоров между Мадонной и Майклом Джексонном), то на каком расстоянии (в среднем) друг от друга они стоят? (Мебели в комнате нет.) Рассуждаем так. Какая площадь приходится в среднем на одного человека?  $100 \text{ м}^2 / 200 = 0,5 \text{ м}^2$ . Но эти  $0,5 \text{ м}^2$  можно представить в виде квадрата со стороной  $\sqrt{0,5 \text{ м}^2} \cong 0,7 \text{ м}$ .\* И получается, что на одного человека приходится в среднем  $0,5 \text{ м}^2$  площади или  $0,7 \text{ м}$  линейного расстояния.

Теперь уже несложно решить (по аналогии) и нашу задачу. На одну молекулу воздуха приходится средний объём  $1 \text{ см}^3 / 2,5 \times 10^{19} = 10 / 2,5 \times 10^{20} = 4 \times 10^{-20} \text{ см}^3$ . (Как видите, и здесь обошлись без компьютера.) Соответствующий линейный размер (расстояние) будет корнем кубическим из найденного объёма:  $\sqrt[3]{4 \times 10^{-20}} \cong 3,4 \times 10^{-7} \text{ см}$ .\*\* Получилось, что

**среднее расстояние между молекулами** в нашем случае **примерно** в  $(3,4 \times 10^{-7}) / (4 \times 10^{-8}) \cong$  **в 10 раз больше размера молекул**.

Довольно просторно с точки зрения человека — находиться в среднем на расстоянии  $10 \text{ м}$  друг от друга (типичный размер

\* Заметим, что  $0,7 \times 0,7 = 0,49 \cong 0,5$ , т. е. для извлечения корня, как чаще всего и бывает, не нужно иметь под рукой калькулятор.

\*\* Если вы думаете, что уж в этом случае нам наверняка пришлось пользоваться калькулятором, то вы опять ошибаетесь. Вот как мы сосчитали этот кубический корень:  $4 \times 10^{-20} = 40 \times 10^{-21}$ . Из второго сомножителя корень извлекается сразу:  $\sqrt[3]{10^{-21}} = 10^{-7}$ . Осталось извлечь корень из 40. Прикидываю:  $3^3 = 27$ , а  $4^3 = 64$ . Нам нужно что-то среднее. Поэтому возьмём  $\sqrt[3]{40} \cong 3,5$ . Проверка на калькуляторе показала, что мы ошиблись лишь в последнем знаке.

человека порядка 1 м). Поэтому, каждый раз, встречая в газете сравнение человеческой толпы на вечернем Бродвее или на Невском проспекте с движением молекул, вспоминайте нашу оценку.

## 15.6. В МИРЕ СУЕТЫ

Слово «газ» происходит от греческого «хаос». Почему?

Все молекулы непрерывно движутся. Откуда они берут на это энергию? Видимо, от других молекул.\* Каким образом они это делают в газе, если не действуют друг на друга на расстоянии? Очевидно, при столкновениях. От чего будет зависеть частота этих столкновений? Ну, во-первых, от расстояния, которое проходит молекула от одного столкновения до другого. А оно чем определяется? Числом частиц на  $1 \text{ см}^3$  газа, это понятно, и ещё, конечно, размерами молекул (три маленькие рыбки реже столкнутся в аквариуме, чем три щуки — если они туда влезут). Во-вторых, частота столкновений зависит от скорости частиц (чем больше, тем чаще).

Итак, мы считаем молекулы газа маленькими шариками, которые взаимодействуют лишь при столкновениях. Расстояние, которое они проходят от столкновения до столкновения, называется **длиной свободного пробега  $l$** . Конечно,  $l$  у разных молекул разная, да и одна и та же молекула между первым и вторым столкновением пройдёт не такое расстояние, как между, скажем, 32-м и 33-м. (Прикиньте сами, можно ли пробраться сквозь толпу, сталкиваясь с людьми всё время через одно и то же число метров.) Поэтому мы будем иметь дело со **средней** длиной

\* А те, другие, откуда у них энергия? Короче: откуда взялась энергия у «самых первых» молекул? Вопрос не такой смешной, как может показаться. Возможно, когда-то очень давно (по некоторым оценкам — порядка 14 миллиардов лет тому назад) произошло что-то вроде взрыва нашего пространства («Большой взрыв»), отдалённым последствием которого является тепловое движение молекул. Здесь не имеет смысла говорить хоть о каких-то деталях этой теории. Важно лишь то, что в какой-то момент (при утверждении мирового бюджета энергий на всю последующую жизнь Вселенной) была выделена громадная сумма джоулей на все виды движения, в том числе и на то, которое мы называем тепловым. И в дальнейшем эта суммарная энергия лишь перераспределялась как между видами энергии, так и между отдельными частицами.

свободного пробега  $\langle l \rangle$ . Кроме того, нам потребуется ещё одна величина — средняя скорость теплового движения частиц  $\langle v \rangle$ .

**Вопрос 110:** А почему, собственно говоря, скорость частицы будет меняться?

**Ответ 110:** Она может меняться в результате столкновений. Ведь частица — мишень (та, на которую налетает наша молекула) может иметь любую скорость. Нетрудно догадаться, что результат столкновения с убегающей мишенью совсем не тот, что с неподвижной или тем более с летящей навстречу.

**Вопрос 111:** Разве длина свободного пробега не совпадает со средним расстоянием между молекулами в газе (см. п. 15.3)?

**Ответ 111:** Не совпадает. Ясно, что  $\langle l \rangle$  должна быть заметно больше  $\langle r_{\text{между}} \rangle$ , так как молекуле гораздо легче промахнуться мимо мишени, чем попасть в неё (ведь  $\langle r_{\text{между}} \rangle$  в десяток раз больше среднего размера молекул  $\langle r_{\text{мол}} \rangle$ ).

## 15.7. СРЕДНЕЕ

**Вопрос 112:** Что вообще следует понимать под средним значением какой-то величины?

**Ответ 112:** Бывают разные виды усреднения и соответственно разные средние. Самое простое — среднее арифметическое. Если первую треть пути выехали со скоростью 50 км/ч, вторую — 100 км/ч, а третью — 30 км/ч, то ваша **средняя (арифметическая)** скорость будет  $\langle v \rangle = (v_1 + v_2 + v_3)/3 = 60 \text{ км/ч}$ . Многие даже не подозревают, что бывают и другие средние. Вот, например, **средняя квадратичная** величина скорости:  $v(\text{кв}) = \sqrt{(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2)/3}$ .

**Вопрос 113:** Найдите  $v(\text{кв})$  машины в примере из предыдущего вопроса и сравните её со средней арифметической.

**Ответ 113:**  $v(\text{кв}) = \sqrt{((50^2 + 100^2 + 30^2)/3)} = \sqrt{((2500 + 10000 + 900)/3)} = \sqrt{(13400/3)} \approx 67 \text{ км/ч}$ . Вывод: имеет смысл ехать со среднеквадратичной скоростью.

**Вопрос 114:** Попробуйте доказать, что никогда среднеарифметическая скорость не может быть больше среднеквадратичной.

**Ответ 114:** Возьмём наиболее простой случай двух скоростей  $v_1$  и  $v_2$ . Нам нужно доказать, что  $\sqrt{((v_1^2 + v_2^2)/2)} \geq (v_1 + v_2)/2$ . Или:  $(v_1^2 + v_2^2)/2 \geq (v_1 + v_2)^2/4$ . Или:  $v_1^2 + v_2^2 \geq 2v_1v_2$ . Или:  $(v_1 - v_2)^2 \geq 0$ , что, очевидно, правильно. Значит, идя от очевидного последнего равенства в обратном направлении, мы придем к тому, что нам нужно было доказать.

Итак, бывают разные математические способы нахождения средних значений.\*

**Вопрос 115:** Как вы думаете, в каких случаях уместно пользоваться именно среднеквадратичным значением величины?

**Ответ 115:** Если бы мы решили найти среднеарифметическую скорость молекул газа, то это было бы очень легко сделать. Потому что она равна нулю. Дело в том, что для такого коллектива молекул все направления движения равновероятны (любой молекуле все равно куда двигаться). Поэтому если есть молекула со скоростью  $v$ , то обязательно найдётся и молекула со скоростью « $-v$ », т.е. движущаяся в противоположном направлении. В таких случаях, если нас интересует только *величина* средней скорости, разумно складывать квадраты скоростей, которые не зависят от знака (направления).

Для молекул воздуха в классе (т.е. при *нормальном* давлении и обычной *комнатной* температуре) средняя длина свободного пробега молекул равна  $\langle l \rangle \cong 10^{-5} \text{ см} = 10^{-7} \text{ м}$ , а средняя скорость теплового движения  $\langle v \rangle \cong 500 \text{ м/с}$ . Поэтому среднее время свободного пробега (т.е. время от одного столкновения до другого) будет  $\langle \tau \rangle = \langle l \rangle / \langle v \rangle = 10^{-7} / (5 \times 10^2) \cong 10^{-9} \text{ с}$ . Итак, от одного столкновения до другого проходит всего  $10^{-9} \text{ с}$ . Иначе говоря, *каждую секунду* любая молекула воздуха испытывает в среднем  $10^9 = 1000\,000\,000$  — **миллиард столкновений!**

Откуда такая большая частота, ведь молекулы не так уж близки друг к другу (помните — для нас это было бы примерно 10 м), да и малость их собственных размеров ( $10^{-8} \text{ см}$ ) не располагает к частым столкновениям. Дело в громадной (для расстояний в мире микрочастиц) средней скорости теплового движения — 500 м за секунду при расстояниях порядка  $10^{-9}$ – $10^{-10} \text{ м}$ !

Заметим, что  $r_{\text{мол}} \ll \langle l \rangle \ll r_{\text{макро}}$ :

средняя длина свободного пробега молекул много больше среднего размера молекул, но много меньше типичных макро-размеров.

\* **Обратите внимание**, что для нахождения любого типа среднего возможны два подхода. Можно взять одну конкретную частицу и искать среднее значение, например, её скорости в различные моменты времени (*среднее по времени*). А можно взять все частицы в один и тот же момент времени и искать *среднее по всему набору частиц* в какой-то один и тот же момент времени. (В первом случае мы как бы пользуемся киноплёнкой, где заснят во времени кусок жизни *одной* из частиц. В другом — мгновенной фотографией *всего коллектива* частиц.) Вы, наверное, удивитесь, но оба подхода дают при вычислениях среднего одинаковые результаты.

**Вопрос 116:** Почему наши уши не замечают непрерывной бомбардировки молекулами?

**Ответ 116:** Совсем не потому, что эти удары слишком слабые (из-за малой массы молекул). Дело в том, что молекулы стучат очень часто ( $10^9$  раз в секунду), и мы не воспринимаем отдельных ударов, а чувствуем (всё-таки!) только суммарный результат бомбардировки — давление воздуха на уши.

## 15.8. ИТАК...

...молекулы-шарики, сталкиваясь друг с другом, могут изменить не только величину своей скорости (и соответственно кинетическую энергию), но и направление скорости, т.е. направление движения. Ведь молекула, хоть и мала, но не точка. Поэтому, как на бильярде, после столкновения и «снаряд», и «мишень» могут начать двигаться в любых направлениях. А теперь добавьте к этому количество частиц в кубическом сантиметре газа, скорость их движения (сотни, а то и тысячи метров в секунду), соответственно — частоту столкновений — и вы получите тот самый хаос, который мы называем газом. Если сверху наблюдать за движением молекулы воздуха, то оно напоминает блуждание не очень трезвого, но стремительного человека ночью по кладбищу, где памятники расположены довольно редко друг от друга (не забудьте, что мы «работаем» с моделью газа).

Зафиксируем, что **тепловое движение — это непрерывное хаотическое движение молекул. Энергия теплового движения — кинетическая энергия внутреннего движения молекул тела.**

Мы «замяли» вопрос о тепловом движении в жидкостях и твёрдых телах, но обязательно к нему вернёмся.

**Вопрос 117:** Существует ли нехаотическое, *организованное* движение микрочастиц?

**Ответ 117:** Существует. Достаточно поместить коллектив молекул (продолжающих свои хаотические блуждания в столкновениях друг с другом) в ситуацию, где *энергетически* выделено какое-то направление, как молекулы начнут реализовывать возможность уменьшить свою потенциальную энергию (вспомним принцип минимума потенциальной энергии). Пример — земная атмосфера. Каждая молекула имеет массу и поэтому тянется Землёй в одном и том же направлении — вниз, к себе. Иначе говоря, молекулам **ВыГОДНО** быть поближе к поверхности земли — там их потенциальная энергия будет меньше. Поэтому на хаотическое тепловое движение молекул атмосферы накладывается их направленное движение к поверхности планеты.

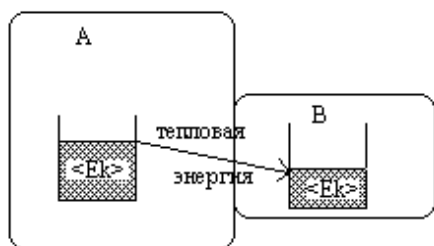
## 16. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ И ТЕМПЕРАТУРА

### 16.1. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ

Возьмём любое тело\* (металлический брусок, сосуд с водой, баллон с газом, можно человеческое тело — безразлично) и каким-то образом сообщим ему тепловую энергию.

**Вопрос 118:** Каким именно образом?

**Ответ 118:** Сообщить тепловую энергию какому-то телу — значит *увеличить* энергию внутреннего движения его молекул. Разумеется, молекулы двигались и до нашего «сообщения». Мы просто заставили их двигаться (в среднем) быстрее. Как заставили? Ну, например, сблизили с более энергичными, чем они, молекулами другого тела. Тогда в результате столкновений более энергичные молекулы поделаются (в среднем) излишком своей энергии. То есть: при контакте двух тел — А (состоящего в среднем из более энергичных молекул) и В (из менее энергичных) тепловая энергия будет передаваться от А к В:



Передача тепловой энергии

**Вопрос 119:** И до каких пор это будет происходить?

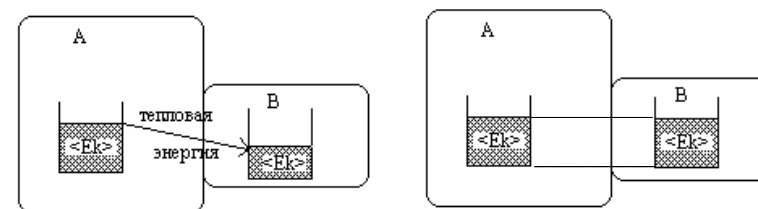
**Ответ 119:** Видимо, пока у тел А и В не выровняются средние кинетические энергии их молекул. Подобно воде в двух бассейнах с разным уровнем до их соединения. Впрочем, окончательное слово, как всегда, за реальным экспериментом.

Если он (эксперимент) подтвердит наши предположения, то к нашим познаниям про тепловую энергию добавится вот что:

**при контакте двух тел с разной средней кинетической энергией молекул тепловая энергия будет (самопроизвольно, т. е. по собственной инициативе) передаваться от внутренне более энергичного тела — менее энергичному.**

\* Любое тело удобно брать мысленно.

## 16.2. И ТЕМПЕРАТУРА



Чем-то эта ситуация до боли знакома...

**Вопрос 120:** Чем? На что это всё ужасно похоже?

**Ответ 120:** Ну, конечно: **при контакте двух по-разному нагретых тел — горячего и холодного — тепло (само по себе!) переходит от более горячего тела к более холодному, до тех пор, пока их температуры не выровняются.**

**Вопрос 121:** Уточним — что значит «горячее», «холодное», что значит «тепло» (или более точно «теплота»)?

**Ответ 121:** «Горячее» или «холодное», очевидно, определяется **температурой** тела: у кого больше **температура**, тот и называется более горячим.

Что касается **теплоты**, то, видимо, это то, что (самопроизвольно) переходит от одного тела другому при их контакте. Естественно, есть большой соблазн сказать, что **теплота (Q) — это тепловая энергия (внутренняя кинетическая энергия молекул), передаваемая от одного тела другому при их контакте:**

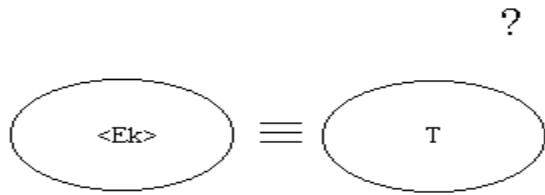


$$T_1 > T_2$$

$$T_1 > T > T_2$$

К ВОПРОСУ О ТОМ, ЧТО ТАКОЕ ТЕМПЕРАТУРА.

Но тогда естественно заявить, что **температура тела — это и есть средняя кинетическая энергия теплового движения молекул этого тела.**



Так?!

**Вопрос 122:** Почему «естественно»?

**Ответ 122:** Сравните рисунки на стр. 155.

**Вопрос 123:** Всё это очень похоже на правду, но есть *одно затруднение*. Если одно тело потеряет единицу энергии (1 Дж), то другое приобретёт ровно такую энергию — 1 Дж (закон сохранения энергии!). А если то же самое тело потеряет единицу температуры (охладится на 1 градус), то совершенно не обязательно второе тело нагреется ровно на столько же. *Например*, купаясь в море, вы охлаждаете своё тело на несколько градусов, но море при этом практически не меняет своей температуры. Получается, что тепловая энергия и температура — это не совсем одно и то же. Как быть?

**Ответ 123:** Это серьёзное возражение. Действительно: тепловая энергия всего тела и его температура — не одно и то же. Но заметьте такую *тонкость*: мы предполагаем совпадение температуры тела со *средней* тепловой энергией *одной* его молекулы! А это не одно и то же. Температура (градусы) не может сохраняться, потому что она говорит об *энергии, приходящейся на 1 молекулу (в среднем)*. Переданный телу 1 Дж может быть поделён между, скажем, миллиардом молекул, а может — между двумя миллиардами, всё зависит просто от массы тела. Ясно, что результат передачи энергии будет для каждой молекулы отличаться (в среднем) в два раза.

### 16.3. ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ:

речь идёт не о том, что у вас 10 яблок, а у меня 10 груш — и у нас их одно и то же количество, т. е. не о *численном* равенстве двух *разных* понятий. Похожая на нашу ситуация — совсем другая.

Если вы говорите, что у вас *болит* зуб, а врач после осмотра произносит слово *кариес*, то вы оба говорите об одном и том же явлении. Просто с разных точек и способов зрения оно выглядит (проявляется) по-разному.

Наша ситуация отличается от зубоврачебной лишь тем, что *дырки* в зубе, а стало быть, *кариеса*, вполне может и не быть,

а *тепловое движение молекул* и, стало быть, *кинетическая энергия молекул* есть всегда. И *боль*, слава Богу, бывает редко, а *температуру* у любого тела убрать невозможно; даже если мы её почти не чувствуем (ни горячо, ни холодно), она есть всегда.

Итак, мы предполагаем, что *одно и то же* — **интенсивность (заметность) теплового движения молекул** можно описать двумя разными способами:

- **на языке микрочастиц** (средняя кинетическая энергия одной молекулы тела) и
- **на языке обычных макротел** (температура тела).

Но *результат* этих двух описаний должен быть *одним и тем же!*\*

### 16.4. ДЖОУЛИ И ГРАДУСЫ

**Вопрос 124:** Значит ли это, что  $\langle E_k \rangle = T$ ?

**Ответ 124:** Можно считать, что американский доллар (D) и шведская крона (SKr) — два способа выразить стоимость одного и того же — золота.\*\* Но если за 1 доллар принята (на сегодняшний день) стоимость 1 г золота, то за 1 крону принята стоимость 1/6 г золота (числа условные). Поэтому между D и SKr существует не равенство, а пропорциональность: 1 доллар равен (сегодня) 6 кронам, т. е.  $D = kSKr$ , где  $k = 6$ .

Точно так же единицы измерения кинетической энергии (*джоули*) и единицы температуры (*градусы*) в своё время были выбраны независимо друг от друга и естественно по-разному.\*\*\* Просто их выбирали разные люди: градусы — те, кто занимался тепловыми явлениями (нагрев, испарение, кипение, плавление), джоули — те, кто изучал механическое движение тел. Поэтому 1 градус мог лишь *случайно* оказаться равным 1 Джоулю. Но не оказался.

\* В седьмом классе меня мучил такой *вопрос*: молекулы тела начинают двигаться быстрее, а *из-за этого* повышается температура тела, или наоборот — повышается температура и *вследствие этого* ускоряется движение молекул?

\*\* На *самом деле* ситуация несколько сложнее, но если мы не собираемся заниматься финансами, то можно считать и так.

\*\*\* Это случилось в те далёкие времена (примерно 150 лет назад), когда *тепловые явления* никак не связывали с *движениями*. Считалось, что существует особая тепловая жидкость, её может быть в теле больше или меньше, от неё и зависят тепловые свойства тела.

Но если *градусы и джоули* — лишь два разных имени одного и того же — интенсивности внутреннего движения микрочастиц, — то между ними должна быть жёсткая связь — *пропорциональность*:

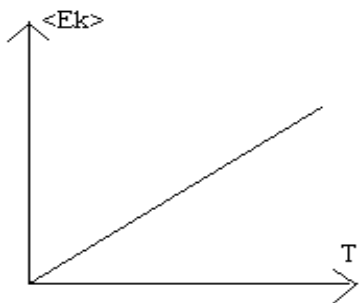
$$\langle E_k \rangle \sim T$$

(т.е. если  $T$  увеличится или уменьшится во сколько-то раз, то и  $\langle E_k \rangle$  поведёт себя точно так же — увеличится или уменьшится во столько же раз).

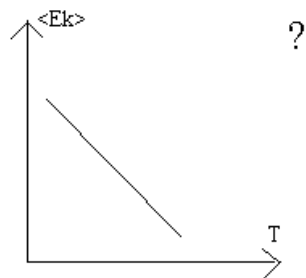
## 16.5. ВОПРОСЫ (И ОТВЕТЫ)

**Вопрос 125:** Как будет выглядеть график зависимости  $\langle E_k \rangle$  от  $T$ ?

**Ответ 125:**



**Вопрос 126:** А почему не годится такой график?



**Ответ 126:** Потому что пропорциональность двух величин означает, что с ростом одной из них другая тоже растёт, а не убывает.

## 16.6. ПРО $\alpha$

Тогда можно ввести коэффициент пропорциональности  $\alpha$  между  $\langle E_k \rangle$  и  $T$ :

$$\langle E_k \rangle = \alpha T.$$

Для доллара и кроны такой коэффициент был равен 6. А у нас?

**Вопрос 127:** Как вы думаете, коэффициент  $\alpha$  должен быть большим или маленьким? (Или средним, т.е. порядка 1?)

**Ответ 127:**  $\langle E_k \rangle$  — это кинетическая энергия одной молекулы. Скорее всего, она должна быть малой величиной — из-за очень малой массы молекулы (по сравнению с обычными макротелами). А вот температура  $T$  представляет всё макротело в целом (температура *тела*). Поэтому вряд ли единицы температуры (градусы) в своё время выбрали такими, чтобы температура тела выражалась очень малым числом. Да и в жизни, как вы помните, мы пользуемся температурами в единицы, десятки градусов. Значит, в равенстве  $\langle E_k \rangle = \alpha T$  коэффициент  $\alpha$  скорее всего, будет очень малым.

**Вопрос 128:** А почему  $\alpha$  должен быть *постоянной* величиной?

**Ответ 128:** Иначе не будет выполняться условие прямой пропорциональности между  $\langle E_k \rangle$  и  $T$ : при изменении  $T$ , например, в два раза  $\langle E_k \rangle$  может измениться в другое число раз.

## 16.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Теперь, если мы знаем, что такое 1 Дж и что такое 1 градус (это у нас ещё впереди, *НУ не сразу строился*, но предположим, что знаем), то величину  $\alpha$  можно определить экспериментально.\*

Из соображений удобства\*\* коэффициент пропорциональности  $\alpha$  записывают в виде такого произведения:  $\alpha = (3/2) \times k$ , где  $k$  но-

\* Как? Предложите вариант.

(Например, можно поступить так. Измерить термометром температуру тела (лучше газа). Затем измерить среднюю энергию движения его молекул. Как? Пусть их пучок (с известным количеством молекул) «ударит» во что-нибудь лёгкое, отклонит какой-то микромаятник. По величине отклонения можно определить энергию молекул. Поделив  $\langle E_k \rangle$  на  $T$ , получим  $\alpha$ . Еще лучше экспериментально определить несколько значений  $T$  и соответствующих значений  $\langle E_k \rangle$ . И нанести соответствующие точки на *график зависимости*  $\langle E_k \rangle(T)$ . По наклону графика можно будет более точно найти величину  $\alpha$ .)

\*\* Мы обязательно сообщим вам эти соображения - если у нас, конечно, ещё сохранился кредит вашего доверия — всё-таки мы успели наобещать довольно много.



сит имя *постоянной Больцмана*. \* Экспериментальное значение  $k$  примерно  $1,4 \times 10^{-23}$  Дж/град. Обратите внимание, что постоянная Больцмана имеет свою размерность (иначе не уравнивать джоули с градусами).

Итак, мы *определили температуру* как величину, прямо пропорциональную средней кинетической энергии теплового (внутреннего, хаотического) движения молекул.

**Вопрос 129:** Энергия молекулы — характеристика микрочастицы, а температура — характеристика всего макротела, т.е. одновременно громадного числа микрочастиц. Как же они могут совпадать?

**Ответ 129:** Если бы речь шла просто о кинетической энергии одной молекулы, то вопрос был бы резонным. Но в том-то и дело, что мы говорим о средней энергии одной молекулы. А средняя величина, конечно, зависит от энергий всех молекул тела, т.е. представляет все макротело в целом.

И вообще: в физике любой **макропараметр = <соответствующий микропараметр>**.

**Вопрос 130:** А нельзя ли было назвать температурой величину, пропорциональную *суммарной* средней энергии всех молекул тела? Чему бы это противоречило?

**Ответ 130:** Нельзя. Вряд ли температура тела может зависеть от *числа* его молекул, т.е. от его массы — чем больше — тем горячее. Такое предположение противоречит опыту.

## 16.8. ВАЖНОЕ УТОЧНЕНИЕ \*\*

Как мы знаем, движение бывает разным: поступательным, вращательным, колебательным, комбинацией этих основных видов движения. Все это касается и макротел, и молекул. Так вот.

\* *Людвиг Больцман* — настолько знаменитый австрийский физик, что в его честь назвали одну из самых знаменитых физических *постоянных*. А самая знаменитая из выведенных им формул (мы с ней ещё встретимся) была выбита на камне, украсившем его могилу.

\*\* *Такая ситуация* — сначала делается какое-то утверждение, а потом оно неоднократно уточняется — в каком смысле его следует понимать, в каких границах оно справедливо — *очень характерна для физики*. Просто слишком сложны сами физические проблемы. Вот нам и остаётся одно из двух: или *ничего не делать*, сетуя на невозможную трудность задачи, или решать её сначала довольно грубо и неточно, а потом, по ходу решения, по мере понимания проблемы уточнять наши первоначальные представления.

Говоря о *температуре*, мы имели в виду среднюю кинетическую энергию только **поступательного** движения молекул. Все наши *ощущения* нагретости, все наши *измерения* температуры термометром связаны именно с «*поступательной*» температурой.

А теперь серьёзно:

**температура тела — это величина, пропорциональная средней кинетической энергии поступательного теплового движения одной молекулы тела:**

$$T = (2/3k) \langle E_k \rangle$$

или  $(3/2)kT = \langle m_1 v^2/2 \rangle, \quad (*)$

где  $m_1$  — масса *одной* молекулы тела,  $v$  — скорость её теплового движения, а значок  $\langle \rangle$  указывает, что берётся среднее значение произведения массы на квадрат скорости (и пополам), т.е. среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекулы.

Итак, равенство (\*) является для нас *определением* температуры. Так определённая температура называется **абсолютной температурой**.

## 16.9. СЛЕДСТВИЯ

**Вопрос 131:** Какие молекулы воздуха в вашей комнате движутся (в среднем) быстрее — *кислорода* или *водорода*?

**Ответ 131:** Так как в одной и той же комнате температура и для тех, и для других молекул одна и та же, то их средние кинетические энергии должны быть равны:  $m_o v_o^2/2 = m_n v_n^2/2$ . Отсюда видно, что более тяжёлые (массивные) молекулы будут двигаться медленнее. Поэтому молекулы кислорода будут в среднем более медленными, чем водородные.

Заметим на будущее такой нетривиальный факт:  
**при одной и той же температуре средние тепловые энергии всех молекул одинаковы.**

**Вопрос 132:** Может ли быть абсолютная температура минус 10 градусов?

**Ответ 132:** Не может. Мы ввели абсолютную температуру так, что она не может быть отрицательной. Иначе оказалось бы отрицательным произведение массы молекулы на квадрат её скорости. А это, как мы знаем, не так.

**Вопрос 133:** Какова самая маленькая из возможных абсолютных температур?

**Ответ 133:** Так как  $T$  не может быть отрицательной, то минимально возможное её значение — ноль градусов.

**Вопрос 134:** Какой смысл имеет ноль градусов абсолютной температуры?

**Ответ 134:** Очевидно, если  $T = 0$ , то  $\langle E_k \rangle = 0$ . Т.е. это температура, при которой должно прекратиться тепловое (хаотическое) движение молекул. Иначе говоря, при  $T = 0$  все молекулы тела должны быть неподвижны относительно друг друга. В частности, при абсолютном нуле не должно быть столкновений между микрочастицами тела. (При  $T = 0$  минимальна не только кинетическая, но и потенциальная энергия взаимодействия частиц между собой.)

**Вопрос 135:** Почему требование  $\langle E_k \rangle = 0$  означает отсутствие всякого движения микрочастиц, а не отсутствие его в среднем?

**Ответ 135:** Что значит «отсутствие движения в среднем» — это значит, что в отдельные моменты времени оно есть, а в другие — его нет, не так ли? Но откуда тогда возьмется  $\langle E_k \rangle = 0$ ? Ведь при усреднении одни значения энергии будут нулевыми, а другие положительными — откуда же возьмётся суммарный ноль?

**Вопрос 136:** Почему при  $T = 0$  не должно быть столкновений микрочастиц?

**Ответ 136:** Потому что они должны быть все неподвижны друг относительно друга.

Бывает ли такая температура в природе? В точности  $T = 0$  — нет.\* Но очень-очень близкая к нулю — сколько угодно, правда не на Земле,\*\* а в далёком (от всяких планет и звезд) космосе. Космическое пространство, как показывают и измерения, и расчёты, совсем не пустое. Оно заполнено так называемым межзвёздным газом (в основном это водород). Его там очень мало (несколько атомов на один кубический сантиметр — сравните с числом атомов в кубике воздуха), но он всё-таки есть. И его абсолютная температура очень близка к абсолютному нулю.

\* Оказывается, абсолютный покой микрочастиц (каждой в отдельности) невозможен — так уж устроен наш мир. Поэтому невозможно достичь абсолютного нуля температуры.

\*\* Можно и на Земле, но только не в естественных условиях (в природе), а в весьма искусственных — в физических лабораториях, да и то далеко не в каждой. Вопреки ожиданиям мир ужасно низких температур оказался страшно богатым и важным для человека — это и сверхпроводимость, и сверхтекучесть, и необычный магнетизм. В настоящее время (1998) в лабораториях удалось получить температуру, отличающуюся от абсолютного нуля всего на одну стомиллионную градуса! (Для заинтересовавшихся — про это есть хорошие книжки: Мендельсон К. На пути к абсолютному нулю. — М., Атомиздат, 1971; Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля. — М., Наука, 1983.)

*Интересно*, что наша земная природа в смысле температуры находится в исключительно нетипичных для всей остальной Вселенной условиях. Потому что 99,9 % всей материи во Вселенной составляют звёзды, температура которых в среднем где-то порядка 20 миллионов градусов.\* Ещё сильно распространён во Вселенной упоминавшийся межзвёздный газ (около нуля градусов). Существование нашей цивилизации требует температур порядка сотен тех же самых градусов.

**Вопрос 137:** Оцените значение типичной *комнатной температуры* (воздуха). Воспользуйтесь информацией из параграфа, где мы оценивали частоту столкновений молекул.

**Ответ 137:** Для *оценки* температуры нам потребуется значение средней кинетической энергии молекул воздуха при этой температуре. Выпишем то, что нам известно: в  $1 \text{ см}^3$  воздуха содержится  $2,5 \times 10^{19}$  его молекул. С другой стороны  $1 \text{ см}^3$  воздуха имеет массу  $0,0013 \text{ г}$ , т.е. его плотность примерно  $1,3 \times 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . (Здесь нам пришлось заглянуть в справочник.) Поэтому масса одной молекулы будет примерно  $1,3 \times 10^{-6} \text{ кг} / 2,5 \times 10^{19} = 5 \times 10^{-26} \text{ кг}$ . Теперь осталось это значение умножить на квадрат скорости ( $500 \times 500$ ) и разделить на  $3k = 3 \times 1,4 \times 10^{-23} \text{ Дж/град}$ . Получается примерно 300 градусов. (Проверьте.) Или плюс 27 градусов по Цельсию. Многовато для реальной температуры воздуха в комнате, но *по порядку величины* мы не ошиблись. И считать было удобно.

**Вопрос 138:** Что можно сказать о температуре газа, состоящего из *одной* единственной молекулы (т.е. о температуре одной, отдельно взятой, молекулы)?

**Ответ 138:** Ничего. Температура введена нами как параметр (характеристика) системы, состоящей обязательно из большого числа молекул. Она и определена через среднее значение энергии члена такого *многочисленного* коллектива. Поэтому понятие температуры *неприменимо* к отдельным микрочастицам и даже к коллективам из не очень большого числа микрочастиц. У отдельной частицы просто *нет* температуры. Представьте себе, что в гонке участвовали всего две автомашины. После гонки вам объявляют, что её средняя скорость была 150 миль в час. Что это вам скажет? Возможно, одна машина сразу сломалась, а вторая понеслась со скоростью 300 миль в час. А может быть, была отчаянная борьба, и обе машины ехали со скоростью примерно 150 миль в час. Есть разница? Но нам её не уловить. Вот если бы в гонке участвовала сотня машин, то информация о той же средней скорости (150 миль в час) означала бы, что примерно 70% всех автомобилей прошла трассу со скоростью от 135 до 165 миль в час. Почувствовали разницу?

\* На поверхности звёзд температура значительно меньше.

## 17. РАЗНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Абсолютная* температура не бывает отрицательной. Типичная комнатная температура — 300 градусов. Все это необычно для наших бытовых представлений. Ну что ж, видимо люди, введившие *привычную* нам температуру, в тот момент недостаточно глубоко понимали смысл вводимого ими понятия. Но большинство людей не имеет чести быть физиками и потому они вряд ли откажутся от многолетней привычки к «бытовой» температуре. Ничего страшного: надо просто понять, как *связаны* между собой привычная нам температура и её *физическая* (абсолютная) родственница.

### 17.1. ПОНИМАЕМ ЛИ МЫ СМЫСЛ АБСОЛЮТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ?

Вроде бы да: это мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул тела. Хорошо. А 100 градусов (абсолютной температуры) — это много или мало? Достаточно для того, чтобы начал таять снег, или нет? А для кипения воды? А для поездки на пляж (если это температура воздуха на улице)?\*

В чём же дело? Почему мы, понимая, что именно *означает* температура, так беспомощны в её оценке? Мы можем легко посчитать, сколько джоулей «стоит» изменение температуры на 1 градус: *каждая* молекула должна повысить свою кинетическую энергию на  $\Delta\langle E_k \rangle = (3/2k) \times 1 \approx 1,5 \times 1,4 \times 10^{-23} \times 1 = 2,1 \times 10^{-23}$  (Дж) — совсем мало. Вспоминаем, что 1 Дж — это энергия движения «частицы» с массой 2 кг (примерно полкирпича) и скоростью 1 м/с.

Температуре в 100 градусов будет соответствовать тепловая энергия молекул порядка  $(3/2k) \times 100 \sim 10^{-21}$  Дж.

Ну и что? Да, мы умеем вместо слов «градусы» мысленно рисовать картинку движения молекул, можем даже украсить её всеми мыслимыми числами — величинами масс, скоростей,

энергий. Но что толку от такого знания — «можно ли ехать на пляж?». Короче говоря, практически неудобно сравнивать градусы с джоулями. Видимо, имеет смысл сравнивать температуру с чем-то столь же нам привычным, легко и часто наблюдаемым, и поэтому вызывающим чёткие ассоциации.

Чтобы ввести абсолютную (физическую) *шкалу температур*, достаточно было равенства  $3/2kT = \langle E_k \rangle$ . Оно задает нам *опорную* температурную точку — ноль градусов — такую, при которой отсутствует тепловое движение, и единицу шкалы: 1 градус абсолютной температуры =  $3/2k$  Дж (k — постоянная Больцмана). После этого мы можем говорить о любой температуре (температуре любого тела).

### 17.2. ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ШКАЛ ПОСТУПАЮТ ИНАЧЕ

Выбирают какое-нибудь природное явление, про которое известно, что оно происходит при строго определённой температуре\* (например, плавление льда или кипение воды) и *договариваются* считать эту температуру равной 100 градусам или 300 градусам, или нулю — все зависит от выбора, сделанного автором данной шкалы температур. Обычно выбирают две такие температурные точки (две метки на шкале термометра). Тем самым производится выбор и величины одного градуса по данной шкале температур.

Вот **пример**. Для своей шкалы в качестве температурных точек **Цельсий**\*\* выбрал как раз температуру кипения воды\*\*\* — её он принял за 100 градусов (обозначение: 100 *значок градуса* C) и температуру, при которой могут сосуществовать лёд и вода (выше её лёд начинает таять, а ниже — замерзает вода)\*\*\*\*. Последнюю температуру Цельсий принял за ноль градусов по своей шкале. (Интересно, что первоначально он сделал наоборот — выбрал за ноль температуру кипения.) Соответственно 1 градус Цельсия — это одна сотая разности между двумя выбранными им температурными точками. Самая низкая из возможных температур по Цельсию — минус 273 градуса.

\* И определённом давлении.

\*\* Цельсий Андерс — шведский астроном и физик. В 1742 году предложил свою шкалу.

\*\*\* При определённом (атмосферном) давлении.

\*\*\*\* См. предыдущую сноску.

\* На последний вопрос ответить нетрудно — ранее мы делали оценку типичной комнатной температуры и получили значение 300 градусов (абсолютной температуры). Поэтому 100 градусов той же температуры *скорей всего* окажется весьма низким (холодным) значением.

**Один градус Цельсия — это сотая доля разницы температур между тающим в воде льдом и кипящей водой.**

### 17.3. АМЕРИКАНЦЫ ПРЕДПОЧИТАЮТ ШКАЛУ ФАРЕНГЕЙТА\*

Любопытно её происхождение. Зима 1709 года в Германии была очень суровой. Поэтому впечатлительный физик за точку отсчёта на своей шкале взял самую низкую из температур той зимы в городе Данциге. Он подобрал смесь льда с солью, имеющую примерно такую же температуру, и принял её за 0 градусов. Для другой температурной точки он сначала выбрал «нормальную температуру человеческого тела», и принял её за 96 градусов. (Интересно, почему не 100? \*\*). Видимо, она казалась ему более постоянной, чем температура кипения. Но потом он одумался и в качестве второй температурной точки взял температуру смеси льда с водой — ту, которую Цельсий принял за ноль на своей шкале. Фаренгейт принял её за плюс 32 свои градуса, а разницу между двумя выбранными точками разделил на 32 части. Это и был один градус по Фаренгейту. Температура кипения воды по этой шкале получилась 212 градусов.

**Вопрос 139:** Выведите формулы перевода температуры по Цельсию в температуру по Фаренгейту и наоборот.

**Ответ 139:** Перевод из Фаренгейта в Цельсия:  $t_c = (5/9) \times (t_f - 32)$ . Для удобства вместо 5/9 можно взять 1/2. Перевод из Цельсия в Фаренгейта:  $t_f = 9/5 \times (t_c + 32)$  или примерно  $t_f = 2(t_c + 32)$ .

### 17.4. ФИЗИКИ ПРЕДПОЧИТАЮТ ШКАЛУ КЕЛЬВИНА\*\*\*

В ней только одна опорная точка — температура тройной точки воды (одновременное сосуществование воды, льда и во-

\* Даниел Фаренгейт, стеклодув из Германии, физикой занимался, видимо, в свободное от основной работы время.

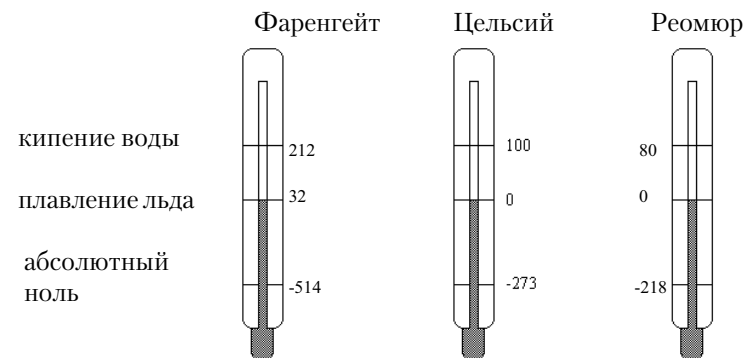
\*\* Говорят, что за 100 градусов Фаренгейт принял температуру тела своей простуженной жены. Тогда понятно, что «нормальная» температура тела должна быть немного меньше.

\*\*\* Лорд Кельвин — английский физик, получил этот титул за научные заслуги. Один из авторов Второго закона термодинамики. Экспериментально открыл эффект Джоуля-Томсона. (До того, как он стал лордом Кельвином, его звали Вильям Томсон).

дяного пара — в одном сосуде). Она принята за 273 градуса.\* Вы, наверно, догадываетесь, что эта та же самая температура, которая у Цельсия была принята за 0 градусов. При этом ноль градусов по шкале Кельвина (или иначе — ноль кельвинов (обозначение: 0К) соответствует нулю абсолютной шкалы температур. Один Кельвин совпадает по величине с 1 градусом абсолютной шкалы и с 1 градусом по Цельсию.

**Вопрос 140:** Каковы формулы перевода температур по Фаренгейту и по Цельсию в абсолютную температуру?

**Вопрос 141:** Во франкоязычных странах распространена шкала Реомюра. Поищите информацию — что это такое?



Три шкалы температур

**Вопрос 142:** Чем же отличается абсолютная температура от температуры по шкале Кельвина?

**Ответ 142:** Абсолютная температура вводится теоретически (через равенство  $3/2kT = \langle E_k \rangle$ ), а температура по Кельвину — через экспериментально наблюдаемые явления (тройная точка и т.д.). Но фактически любая абсолютная температура совпадает с её значением по шкале Кельвина.

\* Такой выбор обладает тем преимуществом, что эта (тройная) точка — единственная (при единственном давлении), в отличие от двойной точки (вода + лед), которая зависит от давления, и при разном давлении эта температура разная.

## 17.5. ТЕРМОМЕТР

Если выйти на улицу и спросить первых десять прохожих — что такое температура,\* то, скорее всего, девять из десяти ответят так: это то, что измеряет термометр. И будут, строго говоря, неправы. (Физика — ужасно недемократичная штука, в ней *всегда* право меньшинство!) Термометры были придуманы за много лет до того, как люди поняли, что именно они измеряют. Мы с вами находимся в гораздо более выгодном положении.

Бывают разные *термометры*. Одни измеряют объём столбика жидкости (обычно подкрашенного спирта) в узкой трубочке, другие — объём газа (газовый термометр, очень точный, но самый неудобный), третьи измеряют электрическое сопротивление (см. главу про ток) металлической пластины. А есть ещё четвертые и пятые.\*\* Но почти в любом случае измеряется какая-то штука, величина которой пропорциональна той тепловой энергии, которую получает (или отдает) термометр от измеряемого тела.\*\*\* Конечно, прежде, чем использовать какую-то «штуку» (газ, спирт, сопротивление) в термометре, надо быть уверенным, что такая пропорциональность действительно будет наблюдаться.\*\*\*\* Это можно проверить *экспериментально*.

**Вопрос 143:** Почему в термометрах используют спирт, ртуть, а не воду?

**Ответ 143:** При нагревании вода расширяется слишком неравномерно. Есть даже диапазон температур, в котором вода при нагревании уменьшает свой объём.

Газовый термометр является очень точным. Дело в том, что изменение объёма газа при нагревании очень точно пропорционально тепловой энергии (теплоте), затраченной на это. А теплота, в свою очередь, точно пропорциональна температуре тела — источника этой энергии.

\* Этим занимались две мои ученицы осенью 1995 года.

\*\* *Интересно*, что для измерения очень горячих и очень холодных тел *термометр* использовать неудобно, и измеряют некоторые величины (тепловое излучение, магнитные характеристики) *самого* сильно нагретого или сильно охлаждённого тела.

\*\*\* Измерение температуры сильно нагретого тела через его собственное тепловое излучение — редкий пример того, как температура измеряется не через «что-то, пропорциональное энергии», а через саму среднюю тепловую энергию.

\*\*\*\* Аналогичный случай был при измерении броуновского движения.

**Вопрос 144:** Но если тело, которое мы называем термометром, в процессе измерения *отбирает* энергию от измеряемого тела, то ведь температура измеряемого тела должна уменьшиться? Тогда выходит, что мы неизбежно измеряем *меньшую* температуру, чем она была у тела до начала измерения?

**Ответ 144:** Это истинная правда. Вообще — *любое измерение неизбежно меняет ту величину, которую оно измеряет*. Единственное, что мы можем сделать, это свести погрешность измерения к минимуму.\* Конечно, медицинский термометр при измерении температуры тела «врёт», но настолько (сотая или тысячная доля градуса!), что он даже неспособен показать это на своей шкале — обычно самые мелкие деления там — десятые доли градуса. Да нам и не нужно знать свою температуру с точностью до тысячной доли градуса. (Не поручись за современную медицину — наверняка существуют случаи, когда необходимо очень точное знание температуры отдельных точек человеческого организма. Что ж — для этого есть другие термометры.)

**Вопрос 145:** Можно ли измерить обычным термометром температуру капли воды?

**Ответ 145:** Нельзя. Измеряемое тело так мало по сравнению с измеряющим (термометром), что процесс измерения существенно изменит температуру капли. В частности: чем крупнее человек, тем точнее мы можем измерить его температуру.

**Вопрос 146:** Чем отличаются эти два способа ?

**Ответ 146:** Вся разница в точности измерения.

\* Или попытаться (в случае необходимости) учесть эту погрешность.

## 18. ТЕМПЕРАТУРА КАК УКАЗАТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

### 18.1. НА ПЛЯЖЕ

Вспомним о приятном: море, солнце, воздух — плюс 97 по Фаренгейту,\* а вы лежите на пляже и занимаетесь своим любимым делом — занимаетесь физикой, т.е. размышляете. Ваше тело нагрето, но, конечно, неравномерно: спина очень горячая, живот довольно холодный (вы лежите на животе), а бока — что-то среднее. Представим, что вам надоело так поджариваться, и вы перешли в тень, под тент. (Можно, конечно, искупаться, но сегодня на море шторм.) Итак, вы на время расстались с солнцем и отдыхаете в тени.

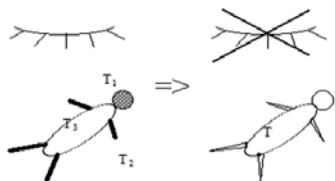
**Вопрос 147:** Можно ли сказать, что температура вашего тела в тени постепенно понижается?

**Ответ 147:** Не совсем так. Сначала *понижается* температура более нагретых участков тела, и *повышается* — более холодных. Происходит процесс *выравнивания* температур и установления некоторой общей температуры всего тела.

**Вопрос 148:** Зависит ли она от температуры окружающего воздуха?

**Ответ 148:** Практически не зависит. Человеческий организм обычно (если он здоров) поддерживает постоянную температуру в пределах плюс-минус 0,5 градуса.

Нарисуем схематически, т.е. отмечая самое главное, то, что с вами произошло:



\* Сколько это по Цельсию?

Наш случай на пляже иллюстрирует **важное свойство температуры** — стремление к выравниванию температур тел (или участков одного тела) при контакте, **стремление к тепловому равновесию**. Разумеется, чтобы это происходило, нужно не мешать контактирующим телам, нужно оставить их в покое, а в идеале — изолировать от всяких посторонних нагревателей и охладителей.

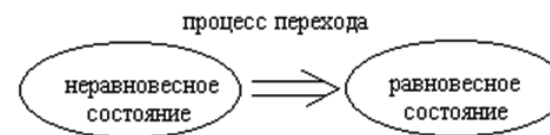
### 18.2. СТРЕМЛЕНИЕ К РАВНОВЕСИЮ

Интересно, стремление к выравниванию при контакте — это персональное свойство именно температуры?

Нет, конечно. (В мире вообще трудно найти что-то исключительное, даже если поначалу оно и кажется невиданным ранее. Но это не значит, что такое вообще невозможно. Ведь если кто-то (Ньютон, Джоуль, Больцман) смог, то почему не смогу я? Все они были тоже всего лишь людьми.) Точно такая же ситуация наблюдается, например, для плотности частиц:



И вообще — для изолированных от внешнего влияния тел наблюдается такая общая закономерность:



Иначе говоря, всякое тело (или система тел), предоставленное само себе, обязательно придёт в такое (равновесное) состояние, когда любая его часть\* будет иметь одну и ту же температуру, одну и ту же плотность частиц, одно и то же дав-

\* Имеются в виду части тела с макроскопическими размерами, т.е. включающие очень много молекул.

ление (если это газ) и т. д. И после этого тело будет оставаться в этом состоянии, если, конечно, его никто не побеспокоит (сохранится изоляция).\*

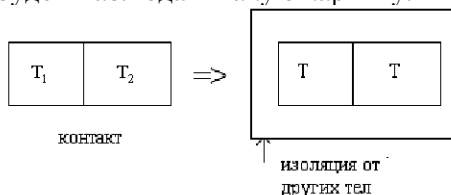
**Вопрос 149:** Что можно сказать о температуре отдельной молекулы?

**Ответ 149:** Мы определили температуру через **среднюю** кинетическую энергию молекул.

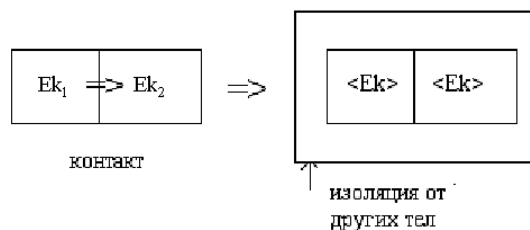
Поэтому величина энергии отдельной молекулы в данный момент времени ничего не говорит нам о средней энергии всех молекул. В принципе можно проследить за энергией отдельной молекулы на протяжении большого периода времени и усреднить все полученные значения. Но практически это сделать крайне сложно. Поэтому можно сказать, что *всякий макропараметр (в частности, температура) имеет смысл лишь для коллектива из большого числа микрочастиц.*

### 18.3. ТЕМПЕРАТУРА: ВТОРОЕ ЛИЦО

Итак, в результате контакта двух тел с разной температурой мы будем наблюдать такую картину:



Или другими словами



Т.е. **выравнивание температур — это выравнивание средних энергий молекул.**

\* Ещё не было случая, чтобы тщательно размешанный в чашке чай сахар сам по себе собрался бы снова в чайной ложке. А сам чай не становится снова более горячим, чем кружка (как было тогда, когда его туда налили).

Для этого тело с большей  $\langle E_k \rangle$  своих молекул должно передать часть этой энергии более бедному в этом отношении партнёру по контакту.

Для чего же нужен контакт тел? Очевидно, чтобы обеспечить возможность молекулам одного тела столкнуться не только со своими молекулами (из своего тела), но и с молекулами другого тела. Именно в этих столкновениях и происходит передача энергии от одного тела другому. Но передача эта происходит не на макроуровне, когда одна машина врежется в другую, а на микроуровне, через столкновение микрочастиц. Конечно, в каждом отдельном столкновении передается ужасно мало энергии,\* но ведь число таких столкновений в секунду громадно.\*\*

В быту мы все часто пользуемся термином «теплота», и при этом не происходит каких-то недоразумений. Но физика — наука точная, поэтому вспомним, что

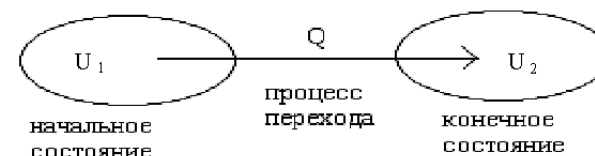
**теплота  $Q$  — это внутренняя кинетическая энергия, передаваемая от молекул одного тела молекулам другого тела.**

Из этого определения следует, что

- тела не содержат теплоты (это не какая-то особая «тепловая жидкость»);
- тела содержат внутреннюю энергию (молекул, атомов);
- теплота появляется *лишь в процессе передачи* энергии от молекул молекулам.

Математик сказал бы так:

*внутренняя энергия  $U$  есть функция\*\*\* состояния тела, а теплота  $Q$  есть функция процесса, в котором участвует тело.*



Кстати, из закона сохранения энергии следует, что

$$U_1 + Q = U_2 \text{ или } U_2 - U_1 = Q \Rightarrow \Delta U = Q$$

изменение внутренней энергии тела в тепловом процессе равно теплоте, полученной телом.

\* Сколько примерно, если дело происходит при комнатной температуре?

\*\* Сколько?

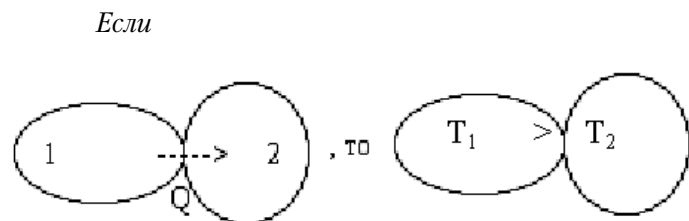
\*\*\* Напомним, что слова «есть функция» означают «зависит от».

**Вопрос 150:** Если тело в результате некоторого процесса (неважно какого) вернулось в своё первоначальное состояние (т.е. пришло к прежней температуре, давлению и т.д.), то изменилась ли его внутренняя энергия? Что можно сказать про теплоту, которую тело получило (или отдало) во время этого процесса?

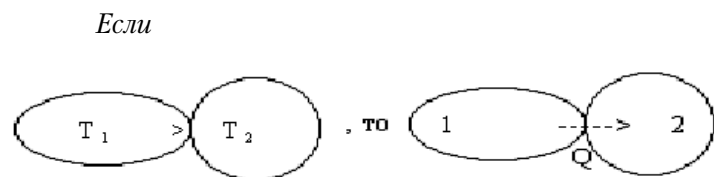
**Ответ 150:** Внутренняя энергия не изменилась — она может измениться только в результате изменения *состояния* тела. Что касается теплоты, то тут всё зависит от вида процесса. Тело могло и получить её, и потерять, и остаться при своих.

А теперь **вернёмся к температуре**. Внимательный читатель мог давно заподозрить, что у температуры как бы два лица (вспомните два взгляда на процесс теплопередачи). Одно — микроскопическое — величина, говорящая нам о средней кинетической энергии молекул тела. Другое — макроскопическое — говорящее о направлении передачи теплоты.

В самом деле, ведь если при контакте двух тел (1 и 2) происходит передача теплоты от тела 1 к телу 2, то можно быть уверенным, что  $T_1$  больше  $T_2$ :



Верно и обратное:



(Конечно, если предоставить тела самим себе.)

Между прочим, вместо того определения температуры, которое мы ввели (через  $\langle E_k \rangle$ ), мы могли бы ввести другое.

**Вопрос 151:** Какое?

**Ответ 151:** Назовём *температурой* тела такую его характеристику  $T$ , которая обладает следующими свойствами:

- если при контакте двух тел  $Q = 0$ , то  $T_1 = T_2$ ;
- если при контакте теплота передается от 1 к 2, то  $T_1 > T_2$ .

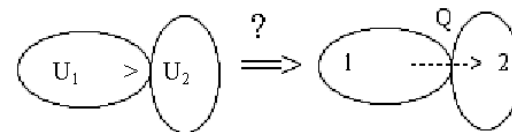
И всё. Можно даже доказать, что такое определение температуры эквивалентно тому, которое мы дали раньше.

**Подведём итоги** нашим размышлениям по поводу температуры.

Это понятие можно представить на языке микрочастиц — величина, пропорциональная средней кинетической энергии молекул тела ( $3/2 \times kT = \langle E_k \rangle$ ) и на языке обычных макротел — величина, определяющая направление передачи теплоты (от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой).

**Вопрос 152:** Верно ли, что при контакте двух тел с разной внутренней энергией ( $U_1 > U_2$ ) теплота будет передаваться от тела 1 телу 2?

Правда ли, что...



**Ответ 152:** *Необязательно*. Вспомним, что внутренняя энергия — это сумма кинетических энергий всех молекул плюс потенциальная энергия их взаимодействия между собой:  $U = (\sum E_k) + E_p$ . При контакте теплота будет передана от тела 1 телу 2, если температура  $T_1$  больше температуры  $T_2$ . За температуру у нас «отвечает» среднее значение  $\langle E_k \rangle$  одной молекулы:  $\langle E_k \rangle = 3/2kT$ . Поэтому выражение для внутренней энергии можно переписать с участием температуры так:  $U = N \times 3/2kT + E_p$ , где через  $N$  обозначено число молекул тела.

Приведём два примера, в которых теплота будет передаваться в обратном направлении — от 2 к 1.

#### 18.4. ДВА ПРИМЕРА

*Пример 1.* Пусть в обоих телах одинаковое число молекул:  $N_1 = N_2 = N$ . Тогда рассмотрим такой вариант распределения энер-



гий:  $U_1 = 5 + (-100) = -95$ , а  $U_2 = 10 + (-110) = -100$ . Видно, что  $U_1$  больше, чем  $U_2$  ( $-95$  больше  $-100$ ), но  $N \times 3/2kT_1$  меньше, чем  $N \times 3/2kT_2$  ( $5$  меньше  $10$ ), т. е.  $T_1$  меньше  $T_2$ . Поэтому теплота будет передаваться от второго тела первому.

*Пример 2.* Пусть первое тело большое ( $N$  велико), но холодное ( $T_1$  мала), а второе наоборот — маленькое и горячее. И пусть ситуация такова, что  $N_1 \times T_1 > N_2 \times T_2$ . Если их потенциальные энергии не повлияют на это неравенство, то у нас опять получается, что тепло будет передано от второго тела первому, хотя первое тело внутренне энергичнее.

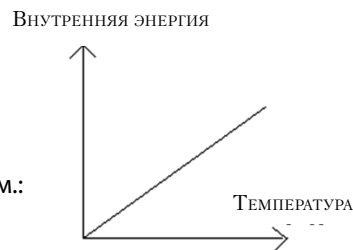
(Конкретный пример: вы, купающийся в море в жаркий день.)

**Вопрос 153:** Оцените массу молекулы воздуха при комнатной температуре, если их средняя скорость 500 м/с.

**Ответ 153:** Комнатная температура  $T = 300$  К. Так как  $m_1 v_2 / 2 = 3/2 \times kT$  и  $k = 1,4 \times 10^{-23}$ , то  $m_1 \cong 10^{-26}$  кг.

**Вопрос 154:** Для газа, молекулы которого практически не взаимодействуют друг с другом, постройте график зависимости его внутренней энергии  $U$  от его температуры.

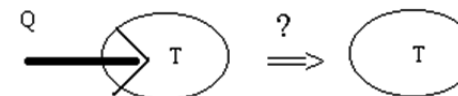
**Ответ 154:** См.:



## 19. ДРУГИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

### 19.1. ВОПРОС ТАКОЙ:

...возможна ли ЭТА ситуация —



т. е.: в результате передачи тепла  $Q$  какому-то телу его температура не изменилась.

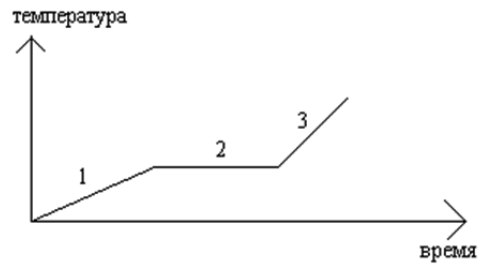
### 19.2. ПРИМЕР: ПЛАВЛЕНИЕ ЛЬДА

Можно начать с эксперимента — взять из холодильника кусок льда, положить его в раковину и направить на него струю воды. Просто рукой вы вряд ли сможете почувствовать: сначала кусок льда немного нагреется (и он ещё не тает), потом нагрев прекратится (т. е. перестанет повышаться его температура), а лёд начнет таять, и пока весь кусок не растает, его температура не будет меняться. Но вот таяние (плавление) льда закончилось — и образовавшаяся вода снова начинает нагреваться.

**Вопрос 155:** Как вы думаете, до какого момента температура нагреваемой воды будет продолжать повышаться?

**Ответ 155:** До того момента, когда она начнет кипеть.

Разумеется, всё будет убедительнее, если вы воспользуетесь термометром. Результат этого эксперимента удобно представить в виде графика зависимости температуры льда (или растаявшей воды) от времени, прошедшего с момента включения струи горячей воды. Теоретически у вас должно получиться что-то вроде:



Изменение температуры льда при его нагреве\*

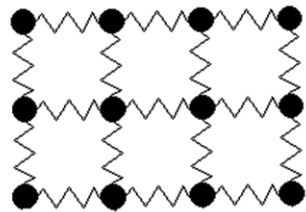
Нас интересует *ситуация на участке 2* — время идёт, тепло продолжает передаваться куску льда, а его температура на это никак не реагирует. Но раз энергия ко льду подводится — она не может исчезнуть совсем.

**Вопрос 156:** Почему?

**Ответ 156:** По закону сохранения энергии.

Если температура льда не меняется — значит, не меняется его внутренняя кинетическая энергия. А куда ещё могла деться переданная телу теплота? Перейти во внешнюю (механическую) энергию? Вряд ли: лёд не изменил ни своей скорости, ни своего положения относительно других тел. Остаётся только *внутренняя потенциальная энергия* молекул льда — энергия их взаимодействия между собой. И это чистая правда.

Лёд — твёрдое тело. Можно *представить*, что он состоит из отдельных шариков (молекул), связанных между собой пружинками:

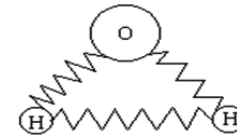


Модель твёрдого тела

\* Очень рекомендуем вам проделать этот вроде бы простейший опыт. Вы быстро убедитесь, что физический эксперимент — это отдельное искусство, его проблемы почти невозможно предвидеть, не прикасаясь к прибору (термометру). Это мир, не знающий прямых линий и плоских участков графика; здесь свои герои, свои радости и свои драмы.

Все молекулы-шарики находятся в непрерывном хаотическом движении. Они **колеблются** — смещаются то в ту, то в другую сторону — насколько им позволяют пружинки и в зависимости от своей личной кинетической энергии, т. е. от температуры тела.

Разумеется, это *грубая модель*. Вы, конечно, понимаете, что на самом деле никаких пружинки нет — они просто изображают то, что мы назвали электрическим взаимодействием молекул между собой. Да и шариков тоже нет — молекула воды похожа скорее вот на что:



Молекула воды

Но такая *простая модель твёрдого тела* достаточна для нашей цели — объяснить происходящее при плавлении льда.

Известно, что обычно\* лёд начинает таять при 32 градусах по Фаренгейту.

**Вопрос 157:** Сколько это по Цельсию? По Кельвину?

**Ответ 157:** Ноль градусов по Цельсию или 273 по Кельвину.

Пусть наш лёд имел сначала температуру 22 градуса, т. е. на 10 градусов ниже того, что называется температурой плавления льда. Начинаем передавать молекулам льда кинетическую энергию (теплоту). В нашей модели она пойдёт на *увеличение размаха колебаний* молекул, т. е. на увеличение их средней кинетической энергии. Другими словами — в результате увеличивается температура нагреваемого тела. Обратите внимание, что, несмотря на усиление колебаний молекул, в среднем их положение друг относительно друга не меняется (из-за пружинки). А это значит, что *не меняется их потенциальная энергия*, теплота идёт только на подъём температуры. Но *при 32 градусах* размах колебаний молекул становится таким, что *пружинки-связи не выдерживают* и начинают рваться. В результате молекулы получают возможность менять (увеличивать) своё среднее расстояние до соседей, т. е. менять (увеличивать) свою потенциальную энергию. Мы видим, что с момента достижения телом определённой температуры

\* При нормальном атмосферном давлении.

(температуры плавления) *открывается новая возможность*, новый канал для использования полученной тепловой энергии — перевод её во внутреннюю потенциальную энергию молекул. При этом *старый канал* (внутренняя кинетическая энергия) *временно* — до насыщения нового — *закрывается*, и, естественно, температура тела до окончания плавления всего тела перестаёт меняться.

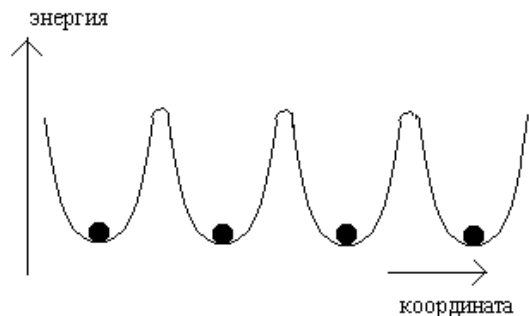
*Можно сказать и так:*

в процессе плавления подводимая к телу теплота тратится на разрыв связей между молекулами твёрдого тела, без изменения их кинетической энергии. И пока все связи не будут разорваны — вся подводимая к телу тепловая энергия будет идти только на это. Лишь после окончания плавления всего тела может начаться процесс подъёма температуры у молекул образовавшейся жидкости.

**Вопрос 158:** При увеличении расстояний между молекулами их взаимодействие ослабевает. Почему же потенциальная энергия их взаимодействия возрастает?

**Ответ 158:** Так как тело твёрдое, то понятно, что его молекулы в среднем именно притягиваются друг к другу, а не отталкиваются. При увеличении расстояний это притяжение слабеет. Вспомним, что притяжению двух частиц соответствует отрицательная потенциальная энергия их взаимодействия. Значит, в твёрдом теле молекулы имеют более отрицательную потенциальную энергию, а освобождаясь при плавлении, они приобретают *менее* отрицательную энергию. (Если у меня было минус 10 Дж, а стало минус 5 Дж, то это и означает, что я увеличил свою энергию на 5 Дж.)

Для твёрдого тела *вместо «пружинок»* часто используется такая модель: периодически расположенные *«потенциальные ямы»*, в которых находятся молекулы-шарики:



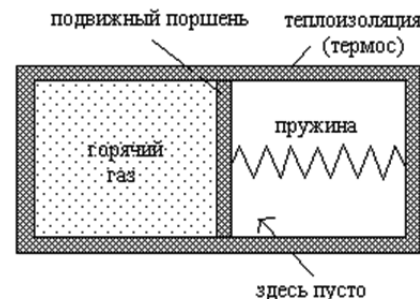
Другая модель твёрдого тела — шарики в потенциальных ямах. Глубина ямы говорит о величине энергии связи молекул-шариков между собой.

Итак, мы рассмотрели ситуацию (плавление твёрдого тела), в которой тепловая энергия, переданная телу, идёт не на увеличение энергии *движения* его молекул, а на увеличение энергии их *взаимодействия*.

Остался такой вопрос: а не может ли передача теплоты привести к увеличению внешней (механической) энергии тела — кинетической или потенциальной?

### 19.3. ДРУГОЙ ПРИМЕР: ГАЗ, СЖИМАЮЩИЙ ПРУЖИНУ

Проведём такой *мысленный эксперимент*:



Поршень тоже сделан из материала, который практически не передает тепло.

Что происходит? Горячий газ давит на подвижный поршень, поршень движется вправо, пружина сжимается, газ расширяется, при расширении он остывает.

Не является ли это примером того, как тепловая энергия газа переходит в упругую потенциальную? В самом деле: в конце концов пружина оказалась сжатой — значит, пружина приобрела упругую потенциальную энергию. От кого? Кто этот богатый (энергией) родственник? Если газ был горячим, а стал холодным, то кто же, кроме него? Ясное дело, что газ потерял какую-то тепловую (внутреннюю кинетическую) энергию, а пружина приобрела внешнюю потенциальную. Всё? Нет, не всё. Мы забыли, что газ ещё и расширился, а значит изменилась потенциальная энергия взаимодействия его молекул. (Они стали подальше друг от друга.) Кстати, величина этой энергии должна была возрасти, хотя и не сильно.

### Вопрос 159: Почему?

**Ответ 159:** Чтобы удалиться друг от друга, молекулам необходимо вылезти из своих потенциальных ям или хотя бы как-то приподняться над дном ямы (см. ответ на предыдущий вопрос). При этом их потенциальная энергия становится менее отрицательной. Но поскольку мы имеем дело с газом, то его молекулы находятся в очень *неглубоких* потенциальных ямах, т.е. слабо взаимодействуют друг с другом. (Недаром газ занимает весь предоставленный ему объём.) Поэтому потенциальная энергия молекул газа при его расширении чуть-чуть вырастет.

Итак,\* что же получается: *заметно уменьшается* тепловая энергия газа, *слабо растёт* его внутренняя потенциальная энергия и *заметно увеличивается* потенциальная энергия пружины. За пределы этой системы тел энергия не должна была вытечь — стенки сосуда представляют из себя своеобразный термос. А тогда *по закону сохранения энергии*

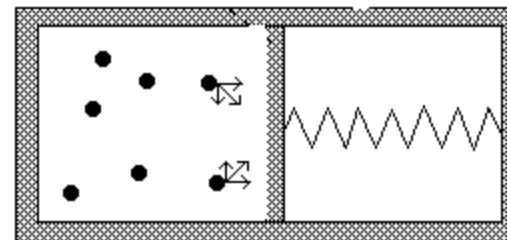
$$\Delta E_{\text{тепл}} \approx -\Delta E_{\text{упр}}$$

Здесь мы *пренебрегли* слабым взаимодействием молекул газа. Символ  $\Delta$  всегда означает «изменение», а *минус* показывает, что энергия газа *уменьшается* одновременно с *увеличением* энергии пружины.

Значит, всё-таки пружина сжимается за счёт *тепловой энергии* газа. Но как же это возможно, если наш поршень не способен передавать *теплоту*?

С *другой стороны*, кто, кроме поршня, мог передать энергию хаотического движения «левых» молекул «правой» пружине? Никто. Получается, что поршень передал пружине эту энергию, но как-то так, что она не нагрелась, а только сжалась. Т.е. он *передал тепловую энергию, но не в виде теплоты, а в каком-то другом виде* — в виде внешней (механической) энергии. Как это могло произойти?

Пружина сжималась потому, что на неё давил поршень. А поршень двигался вправо потому, что его бомбардировали молекулы газа. Конечно, эта бомбардировка была беспорядочной — разные скорости у разных молекул, как по величине, так и по направлениям. Но для движения поршня вправо полезными могли быть только те «части» скоростей, которые были направлены точно в том же направлении — вправо и перпендикулярно поршню:



Только горизонтальные составляющие скоростей молекул (причём, направленные вправо) дают вклад в движение поршня, а следовательно, и в передачу энергии пружине.

Подведём, наконец, **итоги** затянувшегося обсуждения примера с газом и пружиной.

- *Оказывается*, передача кому-то тепловой энергии — это не обязательно сообщение ему теплоты. Можно сказать иначе: в результате остывания одного тела второе, бывшее с ним в контакте, не обязательно нагревается.

- *Оказывается*, возможна и другая ситуация, когда *хаотическая тепловая* энергия передается в виде энергии *нехаотического*, направленного, упорядоченного *движения* (молекул поршня, а потом и пружины). Подвижный поршень как бы отбирает у всех хаотических молекул подходящую ему (для определённого движения) составляющую их энергии.

- *В результате* энергия хаотического движения преобразуется в энергию механического движения поршня, а в конце концов — в потенциальную энергию пружины.

### 19.4 ИТАК...

**...энергия теплового движения молекул** тела может быть передана другому телу

а) в своем обычном, хаотическом виде — **это называется передачей теплоты;**

б) в виде механического, направленного движения — это называется совершением **работы.**

**В первом случае** может измениться средняя кинетическая энергия молекул  $\langle U_k \rangle$  второго тела, т.е. его температура, а может измениться потенциальная энергия взаимодействия его молекул

\* Внимание! Это сложное место.

$\langle U_{\text{н}} \rangle$  — тогда температура не меняется, но происходит изменение структуры тела (меняется плотность, степень упорядоченности молекул и т. д.). Разумеется, возможен и смешанный процесс — с одновременным изменением температуры и структуры тела.

**Во втором случае** (при совершении работы) меняется механическая (внешняя) энергия второго тела  $E$ , т. е. его скорость и/или его положение относительно других тел.

В самом общем случае **часть тепловой энергии может быть передана в виде теплоты, а часть — в виде совершения работы.**

В заключение нарисую схему того, о чём шла речь.

**Схема всевозможных переходов внутренней (тепловой) энергии:**

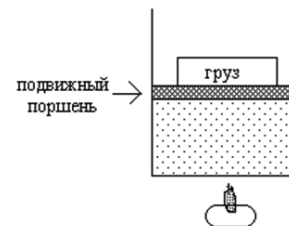
- $\Delta U_{\text{к}} \rightarrow \Delta T \neq 0$  (нагрев)
- **теплота  $Q$**  →  $\Delta U_{\text{н}} \rightarrow \Delta T = 0$  (плавление)
- $\Delta U_{\text{к}}$
- **работа  $A$**  →  $\Delta E_{\text{к}}$  (движение поршня)
- $\Delta E_{\text{н}}$  (сжатая пружина)

**А в общем случае  $\Delta U = Q + A = \Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{н}} + \Delta U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{н}}^*$**

\* Обратите внимание на наши новые обозначения: буква  $E$  использована для обозначения внешней (механической) энергии (всего) тела, а буква  $U$  — для внутренней энергии его молекул.

Кое-где мы (по нашей ленивости) опускаем слова (и соответствующие значки) среднего значения. Мы думаем, что это не приведёт к недоразумению, но зато уменьшит ваше раздражение нашей излишней занудливостью. (Наш опыт говорит, что среди физиков **в среднем** меньше зануд, чем среди прочих категорий граждан. Вы не согласны?)

## 19.5. ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ



**Вопрос 169:** Что будет наблюдаться? Какая энергия переходит в какую?

**Ответ 160:** Нагреватель передаёт тепловую энергию газу. Газ может нагреваться (увеличивать свою внутреннюю кинетическую энергию  $U_{\text{к}}$ ) и расширяться (увеличивать внутреннюю потенциальную  $U_{\text{н}}$ ). При расширении газа поднимается груз на поршне — растёт его  $E_{\text{н}}$  (гравитационная). Если нагрев вести очень медленно, то температура газа почти не будет расти — практически вся тепловая энергия будет идти на совершение работы  $A$  по поднятию груза с поршнем, т. е. на увеличение их гравитационной потенциальной энергии  $E_{\text{н}} = mgh$ . Как уже говорилось, энергия взаимодействия молекул газа растёт, но незначительно.

**Вопрос 161:** Как вы думаете, возможен ли такой экзотический процесс, в котором в результате передачи тепловой энергии какому-то телу оно охладится, т. е. уменьшится его температура?

**Ответ 161:** Понижение температуры — это уменьшение внутренней (кинетической) энергии тела. Значит, должен быть какой-то канал ухода этой энергии из тела. Принципиально таких каналов два — передать кому-то теплоту  $Q$  (но у нас она, наоборот, сообщается нашему телу) или совершить работу  $A$ . Если теплота сообщается нашему телу, то отток энергии за счёт работы должен быть (в единицу времени) больше, чем её приток за счёт теплоты. **Вывод:** работа должна совершаться телом *очень быстро*. Конкретный вариант: если в ситуации предыдущей задачи газ под поршнем сначала был сильно сжат, а потом резко отпущен, то он быстро расширится, поднимет поршень (рывком), а сам газ при этом охладится, несмотря на продолжающийся нагрев.

Внутренняя энергия газа понизится на величину  $(A - Q)$ .

**Вопрос 162:** В приведённых ниже предложениях вставьте в нужном месте слова «теплота» и (или) «температура»:

1. ... — это (внутренняя кинетическая) энергия  $U_{\text{к}}$ , передаваемая при взаимодействии тел и меняющая только их внутренние (но не механические) энергии.

2. ... — это величина, пропорциональная средней кинетической энергии молекул тела.

3. ... существует в любом равновесном состоянии тела.

4. ... существует лишь в процессе передачи внутренней энергии.

5. Результатом передачи телу ... может быть изменение его ... .

6. Повышение (понижение) ... тела говорит о том, что телу передали (или отняли) какое-то количество ... .

Сообщённая телу теплота  $Q$  и соответствующее изменение его температуры  $\Delta T$  связаны между собой. В простых случаях  $Q$  просто пропорционально  $\Delta T$ .\*

---

\* Коэффициент пропорциональности зависит от материала нагреваемого тела, от его массы, от вида процесса нагревания, от диапазона температур, в котором происходит нагрев.

## 20. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ПО ЭНЕРГИЯМ

### 20.1. МНОГО ЧАСТИЦ — ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Любое тело состоит из громадного числа молекул. Понятно, что в идеале хорошо бы иметь информацию про каждую молекулу — где она находится, с какой скоростью движется — тогда мы смогли бы предсказать поведение нашего тела в целом во всех деталях с идеальной точностью. Но, увы, это невозможно. Причины уже упоминались: во-первых, молекул слишком много (настолько много, что даже компьютер не поможет), во-вторых, молекулы слишком маленькие для того, чтобы мы своими «грубыми экспериментальными лапами» смогли измерить их характеристики, не изменив того, что мы хотим померить.

**Вопрос 163:** Представьте себе, что вы хотите обычным термометром измерить температуру маленькой капельки воды. Сможете ли вы это сделать?

**Ответ 163:** Нет, ведь при контакте термометра с измеряемым телом уравниваются их температуры, и устанавливается общая температура — меньше, чем у более горячего, и больше, чем у более холодного. Т.е. она в любом случае не будет равна температуре измеряемого тела до начала измерения. Нам важно лишь, чтобы установившаяся температура (т.е. то, что покажет термометр) была как можно ближе к начальной температуре капли. Это возможно, если из двух тел (термометр и капля) именно капля будет «диктовать» свои условия при контакте. Но так как количество молекул в маленькой капле существенно меньше числа молекул в термометре, то они бессильны навязать громадной «молекулярной стае» свои условия — какую именно среднюю кинетическую энергию стоит иметь совместному коллективу капля+термометр. Наоборот, молекулы термометра слегка поделятся своей энергией с молекулами капли (если они были в среднем более энергичны до контакта), но так как «капельных» молекул много меньше, то каждая из них существенно изменит свою энергию. Поэтому термометр покажет температуру, близкую к своей собственной, а не температуру капли.

Итак, в лоб задачи с участием большого количества маленьких частиц не решаются. Но один из недостатков такой системы (частиц очень много) можно сделать её достоинством. Прежде всего, в таких системах можно работать со средними микро-величинами (скоростями, энергиями частиц) и вводить макро-характеристики тела (температура, давление) через эти микроскопические средние (вспомните определение температуры). Потому что, даже если какие-то отдельные молекулы имеют своё, отличное от большинства «мнение» о скорости или энергии, которую «прилично» иметь молекуле, то их голос утонет в бесчисленном хоре большинства. И мы с вами в большинстве случаев его (этот «энергетический писк») не услышим (и не увидим).

В большинстве случаев — но не во всех.

**Вопрос 164:** Приведите пример из жизни людей, когда мнение большинства не определяет истину. Скорее наоборот.

**Ответ 164:** Например, в науке.

Бывают ситуации, когда существенно, сколько частиц имеют скорость, скажем, в два раза больше средней или в два раза меньше.

Или: какая часть (сколько процентов) всех молекул данного газа имеет скорость больше 1000 м/с.

Или просто: сколько молекул имеют скорость 100 плюс-минус 1 м/с?

Всё это можно рассчитать. Соответствующая математика (теория вероятностей) была заготовлена ещё в 18-ом веке. Спустя примерно 100 лет она была востребована физиками (Больцманом и Максвеллом). Они вывели выражения не только для средних величин, но и для **распределений молекул**.

## 20.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИГЛАСИТЕЛЬНЫХ БИЛЕТОВ

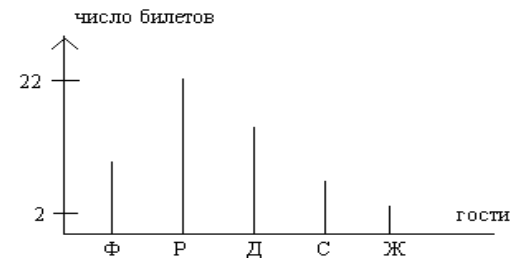
(на банкет в честь получения вами Нобелевской премии по физике)

Пусть всего билетов 50 — столько свободных мест в зале. Сначала прикинем число коллег-физиков из вашей лаборатории — пусть это 12 человек. Ближайшие родственники (ваши и вашей

жены или мужа — не исключено, что к этому моменту вы будете замужем или женаты, всё это надо учитывать заранее) — пусть будет 22 человека (вместе с детьми). Далее ваши «ненаучные» друзья — 11 человек. И осталось ещё 5 билетов — для соседей, не входящих в число друзей. Оставим соседям 3 билета, а 2 зарезервируем для журналистов (пригодится на будущее!).

Итак, мы получили

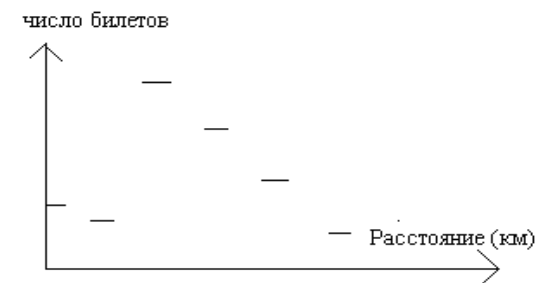
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИЛЕТОВ ПО КАТЕГОРИЯМ ПРИГЛАШЁННЫХ:



(Ф — физики, Р — родственники, Д — друзья, С — соседи, Ж — журналисты)

А можно было построить

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИЛЕТОВ ПО СТЕПЕНИ УДАЛЁННОСТИ ПРИГЛАШЁННЫХ ОТ ВАШЕГО ДОМА:

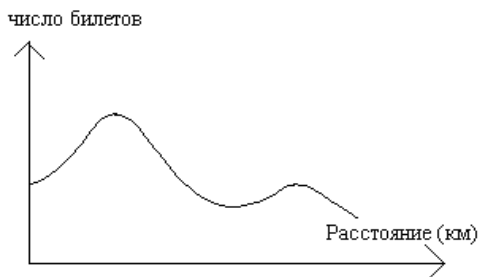


**Вопрос 165:** Не кажется ли вам странным, что, судя по последнему графику, многие из приглашённых живут на одинаковом расстоянии от вас?

**Ответ 165:** Разумеется, если измерять, например, с точностью до метра, то скорее всего все расстояния окажутся разными. И если бы удалось эти точные результаты изобразить на графике (скажем, разницу в 15 м), то всё выглядело бы несколько иначе. Но мы всегда ограничены определённой степенью точности (наших приборов, имеющейся информации, размещения точек на листе бумаги).

**Вопрос 166:** Как изменился бы график распределения билетов по степени удалённости, если бы число приглашённых было очень велико (скажем, 100 000 человек)?

**Ответ 166:** Дело не в отдельных деталях. Прежде всего, график станет более гладким (плавным). И ещё одно — он станет непрерывным. При таком количестве точек мы уже не сможем отличать одну от другой. Но самое главное — если мы сравним подобные распределения для нескольких разных банкетов (но обязательно с громадным числом участников), то эти распределения будут ужасно похожи друг на друга, хотя бы они происходили с разными людьми, в разных местах, в разное время года и т.д.

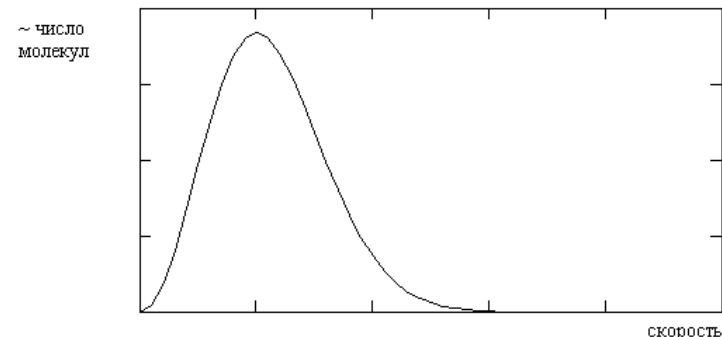


То же распределение, но для большого числа людей (билетов)

### 20.3. ВЕРНЁМСЯ К МОЛЕКУЛАМ, И ПОПРОБУЕМ ПОСТРОИТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ПО ИХ СКОРОСТЯМ

Как обычно, наиболее понятная ситуация наблюдается в крайних (предельных) случаях.\* Ясно, что очень медленных и очень быстрых молекул будет мало. Видимо, большинство молекул будут «кучковаться» в районе некоторой средней скорости. Поэтому кривая нашего распределения будет иметь какой-то колоколообразный вид:

\* Известно, что если физика просят рассчитать, например, устойчивость стула, то первым делом он рассчитывает устойчивость стула с одной ножкой, затем — стул с бесконечным числом ножек (деревянная колода), а затем (на основании полученных результатов) делает вывод про интересующий его случай — стул с четырьмя ножками.



**Вопрос 167:** Уточним кое-что. Будет ли кривая распределения уходить слева в ноль?

**Ответ 167:** Да, потому что число молекул, имеющих *в точности* такую скорость, равно нулю. Что мы этим хотим сказать — что ни одной такой молекулы во всей громадной молекулярной стае нет? Не совсем так: чем с большей точностью мы будем измерять скорость молекул, тем меньше *вероятность* того, что мы найдём хоть одну с нулевой скоростью. А требование иметь «в точности» *какую-то определённую* скорость вынуждает нас заявить — в точности таких молекул нет вовсе! А что же есть? А есть молекулы, попадающие в диапазон скоростей — между  $V-\Delta V$  и  $V+\Delta V$ . Этот промежуток скоростей должен быть обязательно, хоть маленький, но обязательно ненулевой. Сам процесс измерения принципиально вносит некоторую *неопределённость*, неточность в полученное значение скорости.

**Вопрос 168:** Будет ли кривая нашего распределения молекул по скоростям симметричной относительно своего максимума?

**Ответ 168:** Симметрии не будет. Потому что влево от максимума кривая ограничена нулем (по горизонтали у нас откладываются величины скоростей, без учёта их направления), а вправо она ничем не ограничена — должны быть молекулы и с ужасно большими скоростями (хотя их и очень мало). Разве что какие-то пока неизвестные нам законы физики запрещают движение частиц со скоростями больше предельной. Такой закон (постулат) действительно существует (см. рассказ о специальной теории относительности в главе Главные физические теории 20 века). Но величина этой предельной скорости так велика (примерно 300 000 км/с), что можно считать, что правый «хвост» нашей кривой тянется очень-очень далеко, постепенно все больше прижимаясь к оси скоростей.

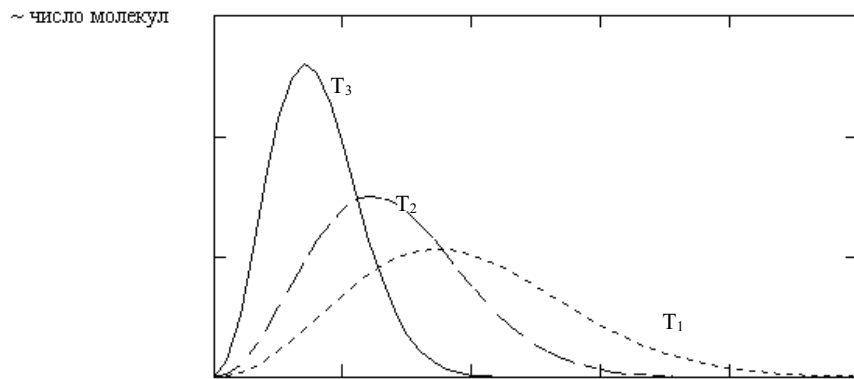


## 20.4. ВАЖНЫЕ ДЕТАЛИ

Итак, *общий характер распределения* молекул по скоростям нам более-менее понятен. Но чем определяется вид конкретного графика? Что для этого нужно задать? Что должно быть известно про тот набор молекул, чьё распределение по скоростям мы хотим иметь?

Прежде всего — их температура. Как она может повлиять на вид распределения? Во-первых, максимум распределения при больших температурах должен сдвинуться вправо, в сторону больших скоростей молекул. (Это следует прямо из определения температуры:  $mv^2/2=3/2(kT)$ ). Во-вторых, чем больше температура, тем слабее должен спадать график в сторону больших скоростей (чем больше температура коллектива молекул, тем больше в нём «горячих» молекул). В третьих, с повышением температуры должно уменьшаться число «холодных» (медленных) молекул, а поэтому подъём кривой распределения от нулевой скорости к максимуму будет более плавным.

Все это можно увидеть на следующем рисунке, где мы изобразили распределение молекул по скоростям для трёх разных температур:  $T_1 > T_2 > T_3$ :

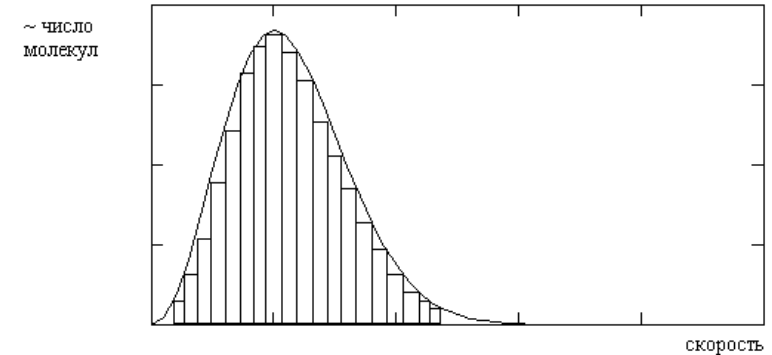


Распределения молекул по скоростям для разных температур ( $T_1 > T_2 > T_3$ )

Глядя на этот рисунок, *возникает вопрос*: почему с повышением температуры высота максимума распределения понижается? Иначе говоря, почему при нагревании тела уменьшается число молекул со скоростью, близкой к некоторой средней? Кажется

бы, если число «холодных» молекул уменьшается, а «горячих» растёт, то число «средних» могло бы остаться прежним. Правда, сам график не симметричен в холодную и в горячую сторону. Но есть и более чёткие соображения.

Вспомним, что наша кривая — фактически результат суммирования ряда «столбиков» молекул:



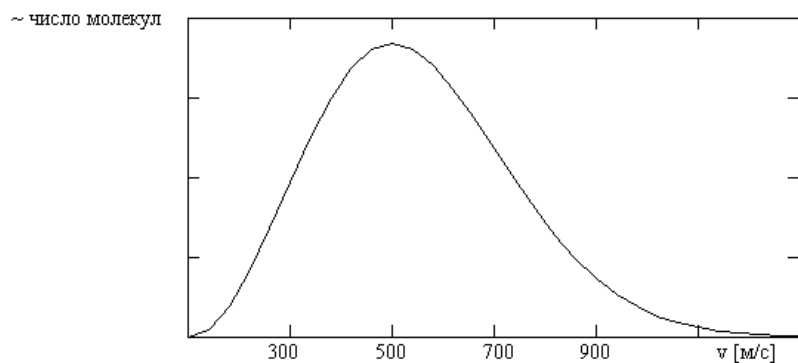
## 20.5. СМЫСЛ ПРОИСХОДЯЩЕГО

Каждый столбик соответствует количеству молекул со скоростями в диапазоне  $\Delta V$ , равном его основанию. Скажем, если разбить весь график на столбики с основанием 1 м/с, то в одном окажутся молекулы со скоростями от 99 до 100 м/с, в другом — от 100 до 101 м/с и т.д. Площадь столбика соответствует числу молекул из данного диапазона скоростей. (Что же тогда высота столбика? Так как площадь = (основание  $\times$  высота), то получается, что по вертикали у нас откладывается не просто число молекул  $\Delta N(v)$  со скоростями из данного диапазона  $\Delta V$ , а их отношение  $\Delta N(v)/\Delta V$ ).

Но тогда площадь под всей кривой (она примерно равна сумме площадей всех столбиков) соответствует общему числу молекул. Поэтому при любой температуре площадь под любой кривой распределения должна оставаться одной и той же. А так как большая часть кривой должна приподняться, то это должно быть скомпенсировано опусканием района максимума.

## 20.6. ПРИМЕР

В заключение продемонстрируем распределение молекул азота по скоростям при комнатной температуре:

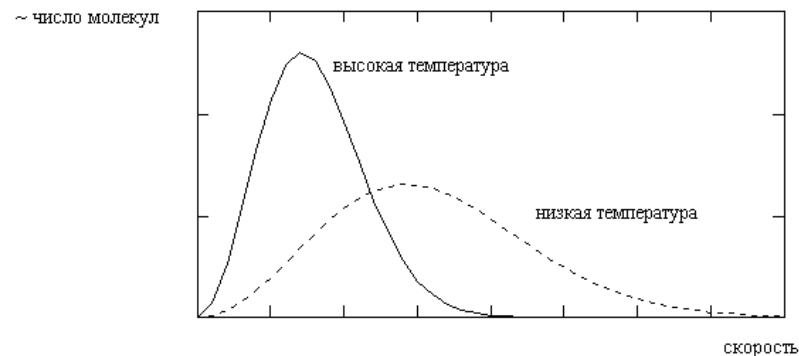


ПРИМЕР КОНКРЕТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ПО СКОРОСТЯМ:  
АЗОТ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

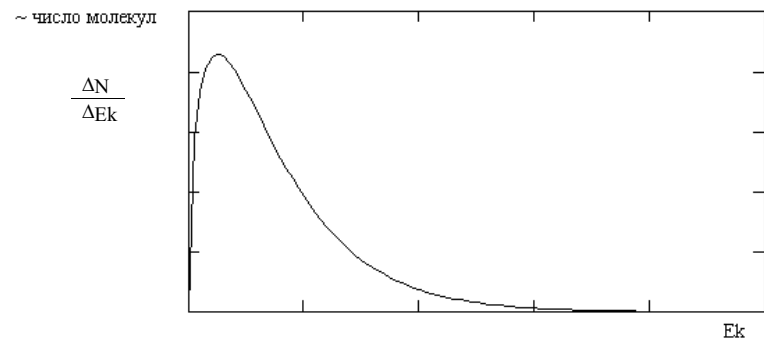
Видно, что максимум кривой распределения приходится примерно на  $V = 500$  м/с. Скорости 60% молекул попадают в диапазон от 300 м/с до 700 м/с. Маленькие скорости (от 0 до 100 м/с) имеют только 0,6% молекул. Быстрых молекул (более 1000 м/с) — чуть более 5%. Остальные молекулы являются холодными «левоцентристами» — имеют скорости от 100 до 300 м/с (более 10%) или горячими «правоцентристами» — от 700 до 1000 м/с (более 20%).

Кстати, понятно, что высокая температура способствует более тщательному энергетическому перемешиванию молекул, и их распределение (и по энергиям, и по скоростям) становится более равномерным, с менее выраженным максимумом.

На следующем рисунке изображены два крайних случая распределений молекул по скоростям — при очень низкой температуре (острый максимум в районе малых  $V$ ) и при очень высокой — почти плоская кривая, слабо спадающая к нулю.



Мы упомянули про распределение молекул по энергиям. Имеется в виду кинетическая энергия теплового движения. Характер этого распределения в основном повторяет ход кривой распределения по скоростям:



( $\Delta N$  — число молекул со скоростями от  $E_k$  до  $E_k + \Delta E_k$ )

**Вопрос 169:** Будут ли совпадать распределения молекул кислорода и молекул азота при одной и той же температуре?

**Ответ 169:** Нет. Вид кривой будет зависеть от массы молекул — она входит в кинетическую энергию частицы. А энергия частицы, наряду с температурой коллектива, определяет конкретный вид распределения.

Прикиньте, чем именно будут отличаться распределения азота и кислорода.

**Вопрос 170:** Зависит ли вид распределения молекул по энергиям от числа молекул?

**Ответ 170:** Нет, лишь бы их было достаточно много — только тогда имеет смысл строить распределения.

**Вопрос 171:** Как объяснить, что при испарении воды температура неиспарившейся жидкости уменьшается?

**Ответ 171:** Молекулы жидкости, хоть и не очень сильно, но всё-таки связаны между собой. Поэтому, чтобы уйти из жидкости (испариться), нужно обладать некоторой энергией больше обычного (среднего). Значит — испаряются (уходят из жидкости) в основном молекулы из «горячего хвоста» распределения молекул по энергиям. С их уходом средняя энергия оставшихся частиц уменьшается. А средняя кинетическая энергия (поступательного движения) — это и есть температура.

Так понятие о распределении молекул (по скоростям, по энергиям) даёт возможность объяснить наблюдаемые экспериментальные факты.

## 21. ГАЗЫ, ЖИДКОСТИ, ТВЁРДЫЕ ТЕЛА (с точки зрения энергии)

### 21.1. ОБСУДИМ: ЧЕМ ОНИ ОТЛИЧАЮТСЯ ДРУГ ОТ ДРУГА?

*Внешние признаки* всем известны — это собственный объём (есть или нет) и собственная форма (есть или нет).

У газов — НЕТ своего *объёма* и НЕТ своей формы.

У жидкостей — ЕСТЬ и НЕТ.

У твёрдых тел — ЕСТЬ и ЕСТЬ.

Но существует и невидимый нам *внутренний признак*, по которому их легко отличить — это разная **степень упорядоченности молекул**.

Можно привести такую аналогию:

**газ** — подобен толпе новобранцев на сборочном пункте (большинство приняли по 1–2 бутылки пива);

**жидкость** — как полк солдат на плацу, которым минуту назад дали команду «Вольно, разойдись!»;

**твёрдое тело** — тот же полк, проходящий мимо трибуны во время парада.

Схематически это будет выглядеть примерно так:



## 21.2. ЕСТЬ ЛИ СВЯЗЬ МЕЖДУ СТЕПЕНЬЮ ПОРЯДКА В КОЛЛЕКТИВЕ МОЛЕКУЛ И ИХ ЭНЕРГИЕЙ?

Сравним между собой средние значения кинетической и потенциальной энергии отдельной молекулы в разных состояниях.

а) В газах, как нам уже известно,  $\langle E_k \rangle$  много больше  $\langle E_n \rangle$

б) В жидкостях — пропустим жидкости — здесь ситуация наиболее сложная (см. замечание про расчёт устойчивости стула в сноске...).

в) В твёрдом теле — молекулы сильно связаны между собой, поэтому их потенциальная энергия должна быть весьма заметной. Но так как эта связь — именно *притяжение* друг к другу (иначе тело не сохранило бы форму и размеры), то  $\langle E_n \rangle$  будет отрицательной и даже сильно отрицательной:  $\langle E_n \rangle \ll 0$ .

**Вопрос 172:** Почему?

**Ответ 172:** Напомним, что наш обычный *выбор* состоит в том, что при очень большом расстоянии между частицами потенциальная энергия их взаимодействия очень мала:  $E_n$  (бесконечность) = 0. Известно, что всякая изолированная от внешнего воздействия система тел желала бы иметь как можно меньшую потенциальную энергию (*принцип минимума потенциальной энергии*). А если вспомнить, что молекулы твёрдого тела при попытке развести их подалеже будут тянуться обратно, поближе друг к другу (вспомните про «пружинки» между ними), то станет ясно, что при их сближении потенциальная энергия взаимодействия должна уменьшаться. Но если на бесконечности она была нулём, то при сближении она может стать только отрицательной.

Ещё раз напомним: *притяжение — это  $E_n < 0$*

и наоборот —  *$E_n < 0$  означает, что взаимодействие является притяжением.*

**Вопрос 173:** О каком *выборе* шла речь в ответе на предыдущий вопрос?

**Ответ 173:** Ввиду относительности потенциальной энергии, при любом расположении частиц можно *выбрать* величину их потенциальной энергии и считать её нулем или любой другой величиной (чаще всего выбирают 0). После этого потенциальная энергия во всех других положениях (расстояниях) получается уже однозначно.

Итак, для молекул твёрдого тела характерно  $\langle E_n \rangle \ll 0$ . Поэтому для соотношения между кинетической и потенциальной энергиями будет справедливо:

$$\langle E_k \rangle \ll \langle E_n \rangle \quad (\text{твёрдое тело}).$$

Здесь символ  $||$ , похожий на прямые скобки, называется *модулем* числа, которое он заключает «внутри» себя. Модуль числа — просто удобное математическое сокращение. Договорились, что модуль отрицательного числа равен соответствующему положительному числу:  $|(-5)| = 5$ . А модуль положительного числа (и нуля) равен самому этому числу  $|5| = 5$ . И вообще:

$$\begin{aligned} |A| &= A, \text{ если } A > 0 \\ &= -A, \text{ если } A < 0 \\ &= 0, \text{ если } A = 0 \end{aligned}$$

Теперь можно вернуться к жидкостям. В них:

$$\langle E_n \rangle < (\text{или порядка}) 0 \text{ и } \langle E_n \rangle \approx \langle E_k \rangle,$$

т. е. действительно промежуточная ситуация между газами и твёрдыми телами.

## 21.3. ПОДВЕДЁМ ИТОГИ НАШИХ СВЕДЕНИЙ ПРО МОЛЕКУЛЯРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИТУАЦИЮ В РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ ВЕЩЕСТВА:

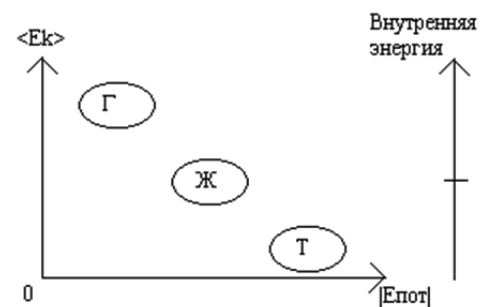
$$\text{газы } \langle E_k \rangle \gg \langle E_n \rangle \quad \langle U \rangle = N\langle E_k \rangle + E_n \cong N\langle E_k \rangle \gg 0$$

$$\text{жидкости } \langle E_k \rangle \sim \langle E_n \rangle \quad \langle U \rangle \cong 0$$

$$\text{твёрдые тела } \langle E_k \rangle \ll \langle E_n \rangle \quad \langle U \rangle = N\langle E_k \rangle + E_n < 0$$

Здесь  $\langle U \rangle$  — среднее значение внутренней энергии всего коллектива молекул, т. е. всего нашего макротела.

То же самое можно изобразить на сравнительных графиках: \*



\* Не следует думать, что ситуация слева изображена для разных состояний при одной и той же температуре!

Итак, **состояние**,\* в котором находится тело, определяется соотношением между двумя составляющими средней энергии его молекул —  $\langle E_k \rangle$  и  $\langle E_n \rangle$ .

С другой стороны, существует взаимосвязь между степенью упорядоченности молекулярного «хозяйства» тела и состоянием, в котором тело находится.

#### 21.4. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Информация о различиях в состоянии тел, собранная нами в таблицу, позволяет нам ответить (хотя бы качественно) на целый ряд интересных вопросов, начинающихся со слов Как? и Почему?

Например: **Как можно расплавить твёрдое тело?**

Расплавить — значит перевести его из твёрдого состояния в жидкое. С молекулярной точки зрения для этого (формально) нужно от ситуации, когда  $\langle E_k \rangle \ll |\langle E_n \rangle|$ , перейти к ситуации  $\langle E_k \rangle \sim |\langle E_n \rangle|$ . Понятно, что для этого есть две отдельные возможности: увеличить  $\langle E_k \rangle$  или уменьшить  $|\langle E_n \rangle|$ . Что означает эта математика физически? Первый способ совершенно ясен: увеличение средней кинетической энергии молекул — это повышение температуры тела. Попросту говоря, нужно его достаточно нагреть.

**Вопрос 174:** Достаточно для чего?

**Ответ 174:** Для того чтобы средняя кинетическая энергия выросла примерно до уровня модуля средней потенциальной. А каков именно этот уровень — зависит от вида молекул, из которых состоит наше тело. Недаром у каждого материала есть своя температура плавления.

Обратимся ко второму способу расплавить тело. Что значит *уменьшить модуль потенциальной энергии?* У твёрдого тела потенциальная энергия молекул сильно отрицательна. Нужно сделать её ещё более отрицательной? Нет, конечно, ведь тогда мы получим ещё более твёрдое тело. А тогда остаётся сделать потенциальную энергию молекул почти положительной (порядка  $\langle E_k \rangle$ ). Что это означает физически, какие нужны действия? *Значит так:* нужно сделать молекулы более свободными друг от друга, т.е. подрагнать их на более далёкие расстояния. Если бы у нас был газ, тогда всё понятно — достаточно *уменьшить его давление*. Ведь давление

\* Говоря о жидком, твёрдом или газообразном состоянии тела, часто употребляют термин «агрегатное состояние».

газа для нас — это частота и эффективность ударов его молекул в стенки сосуда. Уменьшение ударов может говорить либо об уменьшении числа молекул, либо об увеличении расстояний между ними. Но у нас вовсе не газ, а наоборот — твёрдое тело. Как разогнать подальше его молекулы? Нужно «сломать» связи между ними. (Ну, разумеется, ведь процесс плавления это и есть ломка этих связей-пружинок.) Как сломать? А так, как ломают пружину — сжать её сильнее. (В моём детстве большинство движущихся игрушек работали не от батарейки, а от закрученной пружины — они так и назывались — заводные игрушки.) Короче: твёрдое тело нужно сдавить — увеличить давление *на него*.

Итак, **два способа расплавить твёрдое тело** — нагреть его или (и) увеличить давление на это тело. Обратите внимание, что в любом случае для этого необходима некоторая дополнительная энергия.

Кстати, процесс, обратный плавлению — переход из жидкого состояния в твёрдое — называется **кристаллизацией**.

**Вопрос 175:** Что происходит с энергией тела при его кристаллизации?

**Ответ 175:** Уменьшается.

**Вопрос 176:** Если энергия тела при кристаллизации уменьшается, то куда девается разница старой и новой энергии тела?

**Ответ 176:** По закону сохранения энергии энергия никуда не девается — она сохраняется, возможно лишь изменение её формы. В данном случае высвобождающаяся энергия передается окружающим телам (воздуху, стенкам сосуда и т.д.).

**Вопрос 177:** В каком виде окружающие тела получают эту «энергию кристаллизации»?

**Ответ 177:** В виде теплоты. В любом случае это внутренняя энергия молекул. Почему именно кинетическая? А что мы делаем, если хотим из воды получить лёд? Правильно: охлаждаем воду, т.е. уменьшаем её температуру, иначе говоря, уменьшаем кинетическую энергию её молекул — отнимаем у неё теплоту.

**Вопрос 178:** Попробуйте сравнить по величине теплоту испарения и теплоту плавления одного и того же вещества (например, воды). Что больше?

**Ответ 178:** Уточним терминологию. Теплота испарения — разница средних энергий молекулы воды в составе газа (обычно его называют паром данной жидкости) и её же энергией в жидкости. Конечно, эту энергию нужно умножить на число молекул, которые испарились, т.е. ушли из жидкости в пар.

Теплота плавления — то же самое для процесса перехода молекул воды из твёрдого состояния в жидкое. Ясно, что разумно сравнивать удельные теплоты переходов, т.е. относящиеся к переходу одинакового количества молекул, т.е. единицы массы вещества. Что же энергетически труднее — вообще порвать связи со своими соседями по жидкости или сменить упорядоченные связи в твёрдом теле на менее упорядоченные в жидкости? На первый взгляд кажется, что разрыв связей (испарение) — более серьёзный шаг. Но это с нашей, человеческой точки зрения. Откуда мы знаем, может быть, молекулы «думают» иначе? Вполне возможное дело. Но в данном случае (как показывает опыт), молекулы согласны с нами: удельная теплота испарения вещества больше его удельной теплоты плавления. В частности, для воды они отличаются почти в 7 раз.

**Вопрос 179:** Сравните между собой величины внутренних энергий 1 кг льда, 1 кг воды и 1 кг водяного пара.

**Ответ 179:** Чтобы лёд стал водой, нужно передать ему энергию. Чтобы вода стала паром (газом), нужна ещё дополнительная энергия. Поэтому  $U_{\text{л}} > U_{\text{в}} > U_{\text{г}}$  (мы сравниваем одинаковые количества молекул).

**Вопрос 180:** Кто и почему опаснее при ожоге: кипяток или водяной пар той же (100 градусов С) температуры?

**Ответ 180:** Из опыта некоторых людей (к сожалению) известно, что пар в смысле ожога кожи гораздо опаснее, чем кипяток. Причина — см. ответ на предыдущий вопрос.

**Вопрос 181:** Почему, когда мы после купания выходим из воды, даже в жаркий день, нам сначала становится прохладно.

**Ответ 181:** Из-за испарения воды с поверхности кожи. Мы знаем: чтобы уйти из жидкости, молекула должна иметь энергию выше средней. Это значит, что испаряются наиболее энергичные молекулы воды. Уходя из воды, они понижают среднюю энергию оставшихся молекул. Т.е. испарение понижает температуру воды. Именно это понижение температуры мы и ощущаем.

## 22. ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ

### 22.1. ПРИТЯЖЕНИЕ И ОТТАЛКИВАНИЕ

Само существование твёрдых тел и жидкостей говорит о том, что взаимодействие молекул действительно существует. (Всегда приятно до начала разговора быть уверенным, что он не будет пустым.) Действительно, если бы молекулы не притягивались друг к другу, то всё вокруг (да и мы сами) было бы только газом. Притяжение молекул легко почувствовать при попытке растянуть твёрдое тело. Впрочем, попытка сжать то же самое тело (или жидкость, или даже газ) наводит на мысль, что иногда взаимодействие молекул становится отталкиванием.

Видимо на малых расстояниях между молекулами преобладает отталкивание, а на больших — притяжение. Кстати, из этого рассуждения сразу следует, что на некотором расстоянии  $R_0$  отталкивание и притяжение будут скомпенсированы, и взаимодействующие молекулы будут в равновесии.

### 22.2. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ КРИВАЯ

За взаимодействие молекул отвечает их взаимная потенциальная энергия. Как мы выяснили, она будет разной при разных расстояниях между молекулами. Поэтому логично прикинуть **вид потенциальной кривой** — графика зависимости  $E_{\text{п}}(R)$ , тем более что мы уже отмечали: такая картинка может дать много полезной информации о движении и состоянии тел.

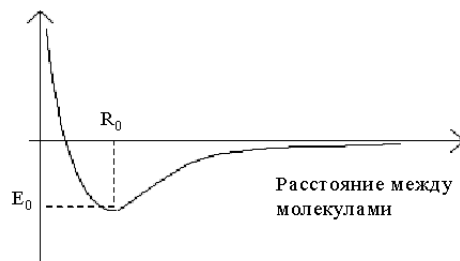
Как обычно, угадывание вида потенциальной кривой начнём с наиболее простых — предельных случаев. На очень больших расстояниях взаимодействия практически нет, поэтому при очень больших  $R$  ( $R = \text{бесконечность}$ )  $E_{\text{п}} = 0$ .

На очень близких расстояниях должно быть сильное отталкивание, т.е.  $E_{\text{п}} \gg 0$  при очень малых  $R$  ( $R \sim 0$ ). Напомним, что *отталкиванию частиц соответствует положительная потенциальная энергия* их взаимодействия. Мы неоднократно говорили об этом.

А что можно сказать про потенциальную энергию молекул в положении равновесия ( $R = R_0$ )? Конечно, она должна быть минимально возможной из всех (см. принцип минимума потенциальной энергии). Т.е. в точке  $R_0$  наша кривая должна иметь минимум. И вообще: самая характерная особенность кривой, которую мы строим, — это наличие у неё потенциальной ямы, дну которой соответствует равновесное расстояние  $R_0$ .

Как обычно, потенциальная яма должна быть «опущена» вниз, в область отрицательных  $E_{\text{п}}$  (связанные между собой молекулы имеют отрицательную потенциальную энергию). Глубина ямы, т.е. расстояние от её дна до уровня  $E_{\text{п}} = 0$  как раз и соответствует энергии, необходимой для разрыва связи между молекулами.

Вот теперь можно практически однозначно нарисовать ход потенциальной кривой взаимодействия двух молекул. Энергию  $E_{\text{п}}$  будем откладывать по вертикали, а расстояние между молекулами  $R$  по горизонтали. Можно считать, что одна из молекул находится в начале координат ( $R = 0$ ), а вторая может перемещаться по оси  $R$ . При этом её энергия будет меняться в соответствии с таким графиком:



Потенциальная энергия

Видно, что при некоторой энергии взаимодействия  $E_{\text{п}} = E_1 < 0$  расстояние  $R$  между молекулами может быть лишь в пределах  $R_1 < R < R_2$ . Повышая энергию молекулы, мы делаем её более свободной. Яма несимметрична: левая её стенка более крутая. Правая — довольно быстро начинает выполаживаться и «прижиматься» к оси расстояний  $R$ .

**Вопрос 182:** О чём это говорит?

**Ответ 182:** Взаимодействие между молекулами достаточно быстро убывает с увеличением расстояния между молекулами.

Каковы типичные значения расстояний и энергий для взаимодействия молекул? Приведём экспериментальные данные для молекулы кислорода, состоящей из двух атомов **O**:

$R_0 \cong 3 \times 10^{-8}$  см, при этом размер самой молекулы  $O_2$ , т.е. расстояние между двумя атомами в одной и той же молекуле примерно в два раза меньше:  $1,5 \times 10^{-8}$  см, а величина энергии связи молекулы (глубина ямы)  $E_0 \cong 10^{-20}$  Дж. Это примерно в 10 раз меньше энергии, необходимой для отрыва электрона от ядра атома.

Каково происхождение этой потенциальной энергии? Разумеется, она электрическая по своей природе.

**Вопрос 183:** Почему «разумеется»?

**Ответ 183:** Методом исключения. Гравитация слишком слаба для таких маленьких масс. А прочие взаимодействия работают либо внутри ядра атома, либо ещё глубже — внутри протонов и нейтронов.

### 22.3. ПРИТЯЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ В СВЯЗИ С ИХ АСИММЕТРИЕЙ

Хотя в целом каждая из молекул (как и каждый атом) электрически нейтральна, но при их сближении для отрицательных зарядов атомов (электронов) возникает возможность расположиться так, что энергия их взаимодействия с соседями будет меньше, чем это было до взаимодействия. Для этого им нужно *расположиться не так симметрично*, как это было до взаимодействия. Отсюда и возникает притяжение (или при сближении отталкивание) двух молекул. Оно сложнее для расчёта, чем кулоновское взаимодействие двух точечных зарядов, и природа его — не только притяжение разноимённых зарядов и отталкивание одноимённых.

## 23. ЭНЕРГИЯ ВНУТРИ МОЛЕКУЛ И АТОМОВ

### 23.1. РАСПОЛОЖЕНИЕ АТОМОВ В МОЛЕКУЛЕ

Молекулы состоят из атомов. Известно, что в распоряжении конструктора любого вещества есть примерно 100 видов атомов. Немало. Но мир молекул гораздо разнообразнее. Мы уже говорили, что есть молекулы из двух-трёх атомов, а есть из сотен тысяч. И дело не только в количестве возможных сочетаний, но и во взаимном расположении одних и тех же атомов.

Энергия молекулы — это, во-первых, энергия взаимодействия атомов молекулы между собой. Качественно это похоже на взаимодействие двух молекул. Природа взаимодействия — та же электрическая энергия. Даже потенциальная кривая этого взаимодействия имеет примерно такой же вид. Разница скорее количественная: **среднее расстояние между атомами в молекуле меньше, чем между соседними молекулами** (для молекулы  $O_2$  более чем в два раза). Кроме того, **величина энергии связи атомов существенно больше, чем энергия связи двух молекул**. Для той же молекулы  $O_2$  они отличаются примерно в 50 раз, а типичная разница — это сотни и тысячи раз.

**Гораздо легче оторвать одну молекулу от другой, чем атом от молекулы.**

Кроме того, атомы, объединённые в молекулу, совершают колебания относительно своего положения равновесия. В некоторых случаях одни части молекул могут вращаться по отношению к другим. Всякому движению соответствует определённая кинетическая энергия. Понятно, что и колебания атомов в молекуле, и внутримолекулярные вращения что-то добавляют во внутреннюю энергию молекулы. Интенсивность этих внутренних движений (размах колебаний атомов, скорость вращения) зависит от температуры тела.

**Ответ 184:** Конечно. Оказывается, **типичная энергия**, приходящаяся на один **тип движения** внутри одной молекулы (колебание, вращение) по порядку величины равна  $kT$  (здесь  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура). Т.е. внутренние движения запасают для молекулы примерно такую же энергию, как и её поступательное движение ( $3/2kT$ ). Заметим, что то, что мы назвали температурой тела, определяется только поступательным движением молекулы ( $\langle E_k \rangle = 3/2kT$ ) и не зависит от колебаний и вращений атомов в молекуле.

### 23.2. СВОЯ ЭНЕРГИЯ И У ОТДЕЛЬНО ВЗЯТОГО АТОМА

Потенциальная — в основном это электрическое (кулоновское) взаимодействие отрицательных электронов с положительным ядром. Кроме того, электроны движутся вокруг ядра, а стало быть, имеют кинетическую энергию.

Интересно, что атом может отдать часть своей энергии просто так, без всякой просьбы или требования со стороны других частиц. Причём, чем больше энергия атома, тем вероятнее, что в некоторый (непредсказуемый) момент он отдаст её малую порцию. Кому? Никому. Вокруг вообще может не быть никого. А впрочем, может кому-то и повезёт (другому атому?). В каком виде отдаст? В виде «порции» света! (Дальнейший разговор на эту тему нам придется временно отложить.)

### 23.3. ЧТО КАСАЕТСЯ ЯДЕР АТОМОВ

...то они подвержены общей закономерности всех частиц — не стоять на месте. Ядра колеблются относительно своего положения равновесия в атоме. На самом деле мы уже встречались с этой энергией, когда упоминали про колебания атомов в молекуле. Потому что колебания атомов — это и есть колебания их ядер. Но у ядер есть и своя личная, **ядерная энергия**. Сам термин всем хорошо известен прежде всего потому, что эта энергия чрезвычайно велика. Чтобы развалить ядро на части, нужна примерно в миллион раз большая энергия, чем для развала атома! Здесь нам опять придётся приоткрыть.

**Вопрос 184:** Как? Чем больше, тем больше?



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На этом заканчивается наше первое знакомство с энергией. Вспомним, как всё было. Нас окружал океан привычных, но непонятных явлений: тела падают, нагреваются, могут быть твёрдыми и жидкими, могут влиять друг на друга даже на расстоянии, могут быть магнитами и излучать свет... Как всё это можно понять, с какой стороны подойти, какой вопрос задать, кроме Как? и Почему? Что как? Что почему? (Многие явления и понятия поначалу не имели даже своих имён.) Да что говорить — иногда мы этих явлений даже и не замечали, точнее — не обращали на них внимания. Просто было ощущение чего-то большого и настолько непонятного (ПРИРОДА!), что не стоит даже и пытаться его понять. Что может быть общего у тока в транзисторе и у сахара в стакане чая? Безумная мысль! И уж совсем невероятно возможность подхода к ним с одной и той же стороны. И вот — **энергия**. Её удивительное свойство — сохраняться, что бы ни происходило — стало тем фундаментом, на котором мы начали возводить **здание Физики**. Появилась возможность оттолкнуться от чего-то заведомо прочного. **Универсальность закона сохранения энергии** позволила нам более-менее одинаково наметить отдельные этажи этого здания — механический, электрический, тепловой, атомно-молекулярный. (Наметить, не более!) Одновременно энергия стала единой лестницей между этими этажами. Постепенно появлялись вертикальные конструкции, несущие любой этаж Физики — анализ **размерности, симметрия, границы применимости, эксперимент как критерий истины, предельные случаи...**

Мы прошли **путь наблюдения и размышлений** от обычных, окружающих нас тел до внутренностей атома. И везде оказалось возможным и удобным пользоваться понятиями **энергии движения и энергии взаимодействия**. Одновременно наметилась некая двойственность в нашем описании поведения тел — на макроскопическом уровне и на языке микрочастиц, появилась **внешняя** (механическая) **и внутренняя энергия**. В результате некоторые понятия (температура) получили даже **двойные имена**.

Оценивая, вычисляя и сравнивая различные энергии, мы смогли познакомиться с масштабом конкретных физических явлений.

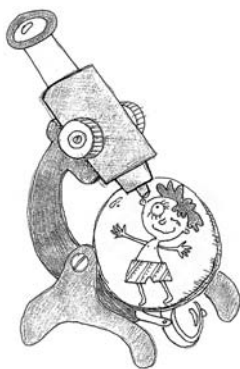
Мы увидели, что часто именно **величина энергии** (большая или, наоборот, маленькая) **определяет поведение** тела в конкретной ситуации.

Издавна начатое нами здание Физики может показаться почти законченным, но вы-то знаете, что это совсем не так. Нас ожидает медленный и детальный проход по каждому этажу. Пока там довольно пусто — пол, потолок, кое-где стены. А ведь нужно будет когда-то и мебель расставлять. Каждый этаж, каждый круг физических явлений имеет свою специфику, свой «диалект физического языка», свой круг основных законов. Но при решении любой физической задачи звание **«нашего самого верного друга»** по-прежнему сохранится за энергией.

**Вопрос:** Почему?

**Ответ:** Потому что она сохраняется.





Иванов Михаил Георгиевич

## **ФИЗИКА КАК СПОСОБ РАЗМЫШЛЯТЬ. ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ЭНЕРГИЯ**

Учебное пособие для учащихся и учителей разных классов  
средних общеобразовательных школ

Редактор *А. С. Русаков*

Художественный редактор *Д. Ю. Матиясевич*

Технический редактор *Е. С. Брискина*

Автономная некоммерческая просветительская организация  
в области естествознания и высоких технологий

**«ШКОЛЬНАЯ ЛИГА»**

Санкт-Петербург, 9 линия ВО, д. 8 каб. 28

е-мэйл: [books@fondedu.ru](mailto:books@fondedu.ru) тел. 8(812)640-21-31

генеральный директор М.М.Эпштейн

Подписано в печать 14.11.2012

Тираж 500 экз. Заказ №

Отпечатано в ООО «Издательство «ЛЕМА»

Санкт-Петербург, Средний пр. В.О., 24 Телефон/факс: (812) 401-01-74

е-mai: [izd\\_lemma@mail.ru](mailto:izd_lemma@mail.ru)