



Молекулярная физика: стыковка школьного и университетского курсов

В.А.Грибов

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
Москва, 26 июня 2018 года



Зачем нужна такая стыковка?

Во-первых, чтобы школьники познакомились с основами науки об окружающем мире, а не с фантастическими историями.

Во-вторых, (пусть это коснется далеко не всех), чтобы в университете им не пришлось переучиваться.



Приступая к изучению очередного раздела физики, мы ждем ответа на следующие естественные вопросы:

- **Какие объекты мы собираемся изучать?**
- **Как выглядят модели изучаемых объектов?**
- **Как, в каких терминах описывается поведение объектов?**
- **Каким основным закономерностям подчиняются объекты?**
- **Какие задачи решаются в рамках данного раздела физики?**



Мы прекрасно знаем,
как эти вопросы выглядят в механике и в электростатике.
Более того, мы имеем представление и о том,
как выглядят ответы на эти вопросы.

А что в молекулярной физике?



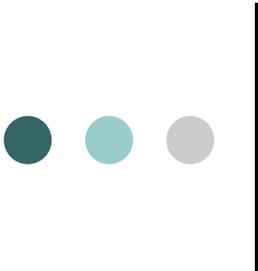
ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ

- Что такое термодинамическая (ТД) система?
- Что значит задать модель ТД системы?
- Что значит задать состояние ТД системы и процесс ее перехода из одного состояния в другое?
- Каким основным закономерностям (началам термодинамики) подчиняются ТД системы?
- Какие задачи решаются в рамках термодинамики?



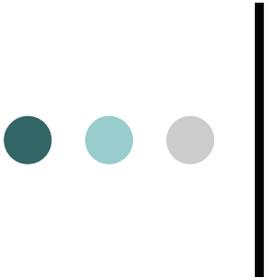
Ни один из известных нам массовых школьных учебников не дает исчерпывающих ответов на весь этот перечень вопросов.

Вузовские учебники написаны лучше, но тоже далеки от идеала.



Учебники для вузов

- **Савельев И.В.** Курс общей физики. В 5 кн.
Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика:
учеб. пособие для вузов. – М.: АСТ; Астрель, 2005.
- **Иродов И.Е.** Курс общей физики. В 5 кн.
Кн. 5. Физика макросистем. Основные законы.
Учеб. пособие для студ. физических и инженерно-
технических специальностей вузов.
М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
- **Сивухин Д.В.** Общий курс физики. В 5 т.
Учеб. пособие для вузов. Т. II.
Термодинамика и молекулярная физика.
М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.



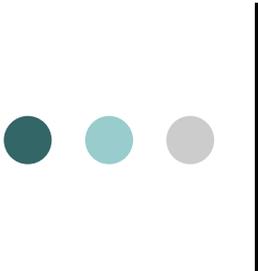
Что такое термодинамическая система?

Критерии отбора

- Во-первых, это макроскопическое тело, состоящее из микрочастиц – атомов, молекул, ионов и т.п. **Число частиц ограничено не только снизу, но и сверху:**

$$1 \ll N \sim N_A \approx 6 \cdot 10^{23} < \infty .$$

Вселенная – не ТД система, потому что это система **бесконечного** числа частиц, связанных силами тяготения.



○ Во-вторых, ТД система подчиняется нулевому началу термодинамики:

– при заданных внешних условиях существует состояние ТД равновесия;

а) оно достигается самопроизвольно за конечное время;

б) оно сохраняется неограниченно долго;

– в состоянии ТД равновесия все внутренние параметры системы однозначно выражаются через внешние;

– **выполняется постулат транзитивности теплового равновесия,**

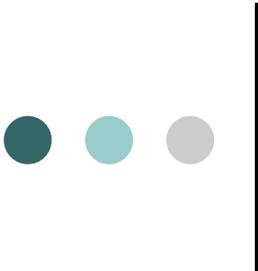
именно в связи с ним

вводится эмпирическая температура (подобно давлению для механического равновесия).



- **В-третьих, ТД система подчиняется первому, второму и третьему началам термодинамики.**

Эти условия фигурируют так или иначе во всех упомянутых учебниках, и школьных, и вузовских, но именно как критерий отбора ни в одном из них не выступают. А зря: это добавило бы ясности изложению, а заодно избавило бы от рассуждений о тепловой смерти Вселенной и т.п.



Что значит задать модель ТД системы?

- В термодинамике модель системы задана извне.
Например, в виде **системы двух уравнений**:

$$\begin{cases} p = p(T, V, N) - \text{термическое уравнение состояния,} \\ C_{VN} = C_{VN}(T, V, N) - \text{калорическое уравнение состояния.} \end{cases}$$

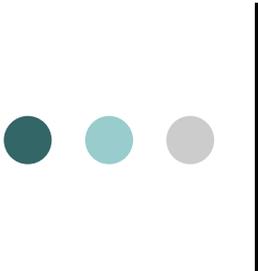
- **модель идеального газа** в термодинамике:

а) одноатомный: б) многоатомный:

$$\begin{cases} pV = \nu RT \\ C_{VN} = \frac{3}{2} \nu R \end{cases} \quad \begin{cases} pV = \nu RT \\ C_{VN} = \nu c_V; \quad c_V = \text{const} \end{cases}$$

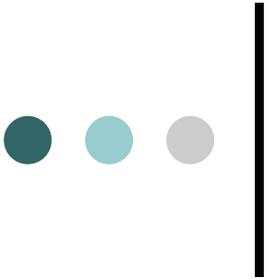


- О необходимости задания термодинамической модели в виде **системы уравнений** состояния **не пишет ни один** школьный учебник **и ни один** из упомянутых учебников для вузов.



Что значит задать состояние ТД системы и процесс ее перехода из одного состояния в другое?

- Задать состояние системы – это задать набор **макроскопических** внешних параметров, описывающих стенки, которыми система отделена от внешнего мира. Например:
 - адиабатически изолированная система – (U, V, N) ,
 - система в термостате – (T, V, N) ,
 - система под поршнем – (T, p, N) , и т.д.
- Задать процесс перехода из одного состояния в другое – это задать, например:
 $p(V)$ при $N = \text{const}$, $V(T)$ при $N = \text{const}$ и т.п.



Начала термодинамики

- **Первое начало** в записи

$$Q = \Delta U + A \text{ или (что полезнее) } \delta Q = \Delta U + \delta A$$

– теорема существования внутренней энергии U – однозначной функции состояния ТД системы (в отличие от δQ и δA , зависящих от процесса перехода).



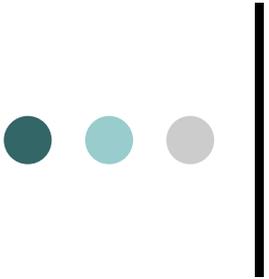
Второе начало формулируется отдельно для обратимых и для необратимых процессов. Если не упоминать энтропию, то, например, так:

1. Через заданное равновесное состояние ТД системы проходит только одна обратимая адиабата

(аналогично тому, что изотерма тоже одна, и изобара – тоже, и изохора).

2. Невозможно передать теплоту от более холодного тела к более нагретому без компенсации (Клаузиус). Это констатация общеизвестного опытного факта, и это нагляднее формулировки Томсона.

Математический аппарат термодинамики на этом замыкается.



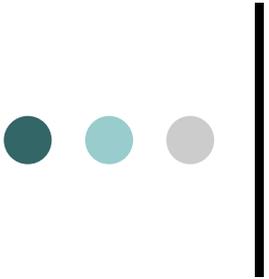
Третье начало

- Абсолютный нуль температуры недостижим.

или

- При $T \rightarrow 0$ в любой ТД системе теплоемкость любого процесса стремится к нулю (в том числе $C_{VN} \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$).

Эти формулировки начал термодинамики либо даны в упомянутых учебниках для вузов, либо следуют из приведенных там. Так что с этой частью описания в вузах всё благополучно.



Какие задачи решаются в рамках термодинамики?

- По модели ТД системы и заданным внешним параметрам подсчитать любую равновесную термодинамическую величину, в частности: внутреннюю энергию U , теплоемкость любого процесса C_α и т.д.
- По модели ТД системы рассчитать в произвольном квазистатическом процессе любые тепловые эффекты, работу и т.п.: Q_{12} , A_{12} , η и т.д.

Ни в одном из упомянутых нами учебников о задачах термодинамики ничего не сказано.



Таким образом, в школьном курсе молекулярной физики есть все возможности для изложения предмета на научной основе.

Недостает структурированности, даже жесткости изложения. Если решить эту задачу, знание предмета станет заметно лучше.

Однако долгие годы преподавание молекулярной физики в школе, да и в вузах демонстрирует другую тенденцию:

верные в частном случае утверждения возводятся в ранг универсальных закономерностей. И это никак не помогает изучению предмета.



Самый распространенный миф:

температура является мерой средней кинетической энергии хаотического движения молекул в макроскопических телах

Это утверждение в общем случае неверно.

Нарушается III начало термодинамики:

если $\varepsilon \sim kT$, то $c_v = \text{const} \neq 0$.

Контрпример: газ электронов проводимости в металле при комнатной температуре как идеальный ферми-газ

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \frac{N}{V} \right)^{2/3} \quad U = \frac{3}{5} N \varepsilon_F$$

Температурные поправки $\Delta\varepsilon \sim (kT/\varepsilon_F)^2$ ничтожны.

Вывод: утверждение применимо только к классическим системам



Самый «звонкий» миф:

закон возрастания энтропии

Это утверждение тоже в общем случае неверно

В действительности второе начало термодинамики для необратимых процессов гласит:

$$TdS > \delta Q'$$

И только **в адиабатически изолированной системе** ($\delta Q' = 0$) при необратимом переходе к ТД равновесию энтропия системы возрастает.

А при необратимом процессе остывания чайника энтропия воды **убывает**.



Еще один миф об энтропии:

$S = k \ln W$, где W – вероятность состояния

Лукавая терминология: здесь статистической вероятностью назван статистический вес Γ – число разных микросостояний, реализующих данное макросостояние. А любая вероятность

$$W \leq 1$$

Это аксиома.

В действительности справедливы другие равенства:

$$S = k \ln \Gamma$$

$$S = -k \sum_n w_n \ln w_n = -k \overline{\ln w_n}$$



Итоги

- Необходимая ясность изложения курса молекулярной физики в школьном учебнике реализована едва ли наполовину.
- Популярные вузовские учебники написаны яснее, но и там не всё благополучно.
- Вместо наведения необходимого порядка изложение сопровождается псевдонаучной мифологией.
- Пора бы и порядок навести.
Для этого есть всё необходимое.

Полезная ссылка:

*Квасников И.А. Молекулярная физика.
М.: Эдиториал УРСС, 1998.*