Методика преподавания физики

Курс лекций профессора Николаева В.И.

Записали аспиранты Головин Григорий, Егоров Олег, Жвания Ирина, Оболенская Анастасия, Потемкин Федор.

Оглавление

Общие принципы решения физических задач ... 2
Четыре типовых вопроса ... 2
Виды моделей в физике ... 3
Требования к формулировкам определений ... 3
Опорные фразы ... 3
Дидактические достоинства общего курса физики ... 4
Задача о машине Атвуда как тест ... 4
Роль подсказки в преподавании ... 6
- О подсказке ... 6
- Разновидности подсказки ... 6

«Обратные» задачи ... 6
- Задача №1: Уравнение кинематической связи ... 6
- Задача №2: Усилитель ... 7
- Задача №3: Система линз ... 7
- Задача №4: Сила ампера ... 7

Задачи с капканом ... 7
- Капкан №1: Направление тока в источнике ... 7
- Капкан №2: Показания вольтметра ... 7
- Капкан №3: Оценка ситуации ... 8
- Капкан №4: Задача о машине Атвуда ... 8
- Капкан №5: Задача об относительной влажности ... 8

Мнемонические правила в общем курсе физики ... 8
Термодинамический квадрат ... 11
- 1. Введение ... 11
- 2. Основные формулы ... 11
- 3. Мнемонические правила: немагнитные системы ... 13
- 4. Обобщение на случай магнитных систем ... 19
- 5. Случай трех переменных ... 21
- 6. Заключение ... 24
- Литература ... 24

Подготовка преподавателя к занятиям ... 24
Подготовка преподавателя к занятиям (переструктурированный вариант) ... 25
Работа над диссертацией ... 26
Некоторые определения ... 28

Общие принципы решения физических задач

1. В основе методов решения физических задач – физические законы.
2. Всякая задача может быть решена только в рамках выбранной абстрактной модели. Разновидности моделей:
    - Абстрактная – это абстрактный объект или явление, которое мы рассматриваем взамен реального объекта или явления в данной задаче.
    - Физическая – это реальный объект или явление, которое мы рассматриваем взамен реального объекта или явления в данной задаче.
    - Математическая – это модель основанная на система уравнений.
    - Компьютерная – это модель на основе возможности компьютеров.
    - Демонстрационная – это любая модель, удобная для показа.
3. Математика при решении физических задач играет роль инструмента исследования.
4. Решение физической задачи справедливо, строго говоря, в рамках выбранной системы отсчета.
5. Критерием правильности решения физической задачи, является, в конечном итоге, опыт.
6. «Всякое слово должно иметь смысл» (китайская народная мудрость).
7. В исходной системе уравнений каждое уравнение должно иметь название.
8. Сначала – система уравнений, потом – её решение.
9. В физике сравнивают величины одинаковой размерности.
10. Последний этап решения физической задачи – анализ полученного результата (например: рассмотрение характерных частных случаев, применение правила размерностей, общая оценка разумности полученного результата, отбор корней).

Четыре типовых вопроса

1. Что такое

    Примеры:

    1) Что такое падение напряжения?
    2) Что такое материальная константа?
    3) Что такое резонанс токов (напряжений)?
    4) Что такое материальная точка?
    5) Что такое точечный источник света?
2. Приведите пример

    Примеры:

    1) Приведите пример нелинейно-оптического явления.
    2) Приведите пример материальной константы.
    3) Приведите пример кинематической связи.
    4) Приведите пример задачи, в которой Землю можно считать материальной точкой.
    5) Приведите пример задачи с недостающими данными.
3. Как соотносится

    Примеры:

    1) как соотносятся линейная и нелинейная оптика?
    2) Как соотносятся уравнение теплового баланса и первое начало термодинамики? (Уравнение теплового баланса является частным случаем первого начала термодинамики в том случае, когда работа системы равна нулю)
    3) Как соотносятся законы динамики и законы Ньютона? (Законы Ньютона входят в законы динамики)

4) Как соотносятся переносная сила инерции и центробежная сила инерции? (Центробежная сила инерции является частным случаем переносной силы инерции)
5) Как соотносятся пьезо-, пиро- и сегнетоэлектрики? (Сегнетоэлектрики частый случай пироэлектриков, которые в свой очередь являются частым случаем пьезоэлектриков)
6) Как соотносится механика Ньютона и Общая Теория Относительности?

4. Сколько

   Примеры:

   1) Сколько начал термодинамики вы знаете? (4)
   2) Сколько правил Кирхгофа вы знаете? (2)
   3) Сколько типов фазовых переходов вы знаете? (2)
   4) Сколько видов моделей в физике вы знаете? (5)
   5) Сколько разновидностей сухого трения вы знаете? (4)

Виды моделей в физике

1. Абстрактная – это абстрактный объект или явление, которое мы рассматриваем взамен реального объекта или явления в данной задаче.
2. Физическая – это реальный объект или явление, которое мы рассматриваем взамен реального объекта или явления в данной задаче.
3. Математическая – это модель основанная на система уравнений.
4. Компьютерная – это модель на основе возможности компьютеров.
5. Демонстрационная – это любая модель, удобная для показа.

Требования к формулировкам определений

Существует 3 требования к формулировкам определений:

1. Определение должно <u>начинаться</u> с определяемого понятия
2. Должно быть логически <u>однозначным</u>
3. Оно должно содержать в себе способ <u>экспериментального</u> измерения определяемой величины.

Самое трудное в формулировке определения – первое слово после слова «это».

Пример: Резонанс токов – это…; Резонанс напряжений – это…

Определение можно начинать с именительного или творительного падежа.

Пример:

Материальная константа – это константа, характеризующая свойства материала

Материальной называется константа, характеризующая свойства материала

Опорные фразы

1. Ну, с чего начнем?
2. С чего начнем, конечно?
3. А в прошлый раз с чего мы начинали?
4. Вы смотрели сегодня в плоское зеркало?

5. Что больше: один метр или два килограмма?
6. Вывод должен сидеть в руке!
7. Вор должен сидеть в тюрьме, а вывод – в руке.
8. На перекрестке обычно стоит кто? (*ноль*)
9. В механике два основных метода решения задач:
    a. С помощью законов динамики;
    b. С помощью законов сохранения.
10. Закон движения – вовсе не закон!
11. Чья сила (*и показывать на чертеже*)?
    Сюжет:
    -Сила натяжения, чья сила?
    - Ниткина

    - Кориолисова сила инерции, чья сила?
    - Ничья
12. Всякий неупругий удар является упругим, а каждый упругий – неупругим. (*Правильно говорить – абсолютно упругий и абсолютно неупругий.*)
13. Куда направлено поле – там потенциал меньше.
14. Всякую однотипную работу надо проводить серийно.
15. На какую тему задача?
16. Последствия противодействуют причине *или* Всё назло *или* Правило Ленца
17. «Всякое слово должно иметь смысл» (китайская народная мудрость)
18. Все надо структурировать!

Дидактические достоинства общего курса физики

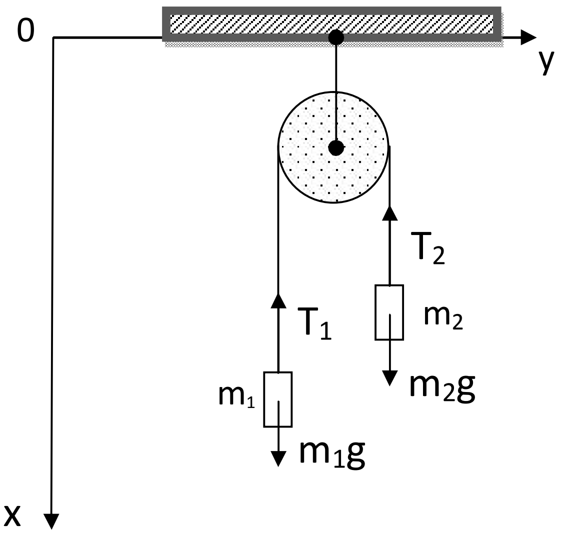
1. Общий курс физики – фундамент физического образования.
2. Закладывает основы системного подхода к оценке ситуации.
3. Общий курс физики – как полигон. В нем есть практически все для развития человеческого интеллекта.
4. Его неотъемлемая часть на всех этапах изучения – опыт.
5. Физике не обучают, ее изучают!
6. Учит постепенности и основательности во всем. Его главный метод на начальных этапах изучения – индукционный, на последующих этапах – дедуктивный во все более возрастающей мере.
7. Формирует полезные для жизни привычки.
8. Учит вариативности в поисках выхода из ситуации.
9. Воспитывает уважение к истории развития человечества и человеческой личности.
10. Учит структурировать.
11. Учит уважению к языку науки.
12. Приводит к убеждению о целостности картины мира и взаимосвязанности явлений (все на все влияет!).
13. Формирует чувство уверенности в себе.

Задача о машине Атвуда как тест

Задача. Найти ускорение тел системы в следующих предположениях:

1. Нить невесома
2. Нить нерастяжима
3. Блок невесом

4. Трение в оси отсутствует
5. Сопротивление воздуха отсутствует



<u>Решение.</u> Запишем систему уравнений:

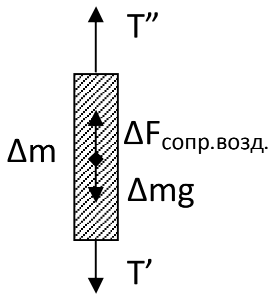
Уравнение движения первого тела: $m_1g - T_1 = m_1a_1$ (1)
Уравнение движения второго тела: $m_2g - T_2 = m_2a_2$ (2)
Уравнение кинематической связи: $a_1 = -a_2$ (3)
Ранее доказанное утверждение (доказывается ниже):
$T_1 = T_2$ (4)

Из этой системы уравнений задача далее легко решается. Суть этой задачи как теста в наглядной проверке того, какие из введенных пяти предположений (далее - усл.1, усл.2, ..., усл.5) о нашей системе влияют на конечный вид каждого из полученных четырех уравнений и каким образом.

<u>Теорема.</u> Если раз, два, три, четыре, пять, то $T_1 = T_2$.

Докажем ее в 2 этапа. Сначала докажем, что

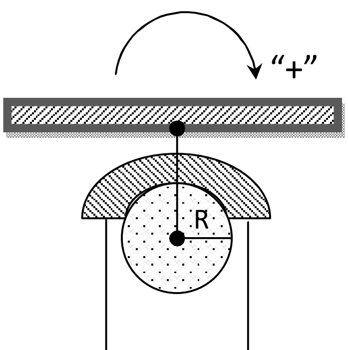
а) натяжение нити всюду вдоль ее прямолинейного отрезка одинаково.
С этой целью запишем уравнение движения для некоторого прямолинейного отрезка нити в проекции на ось x.



$\Delta mg + T' - T'' - \Delta F_{сопр.возд.} = \Delta ma$
$\Delta mg = 0$, т.к. нить невесома (усл. 1).
$\Delta ma = 0$, т.к. нить невесома (усл. 1).
$\Delta F_{сопр.возд.} = 0$, т.к. сопротивление воздуха отсутствует (усл. 5).
Отсюда вытекает, что $T' = T''$.

б) Докажем теперь, что натяжение нити по разные стороны блоков одинаково. С этой целью запишем уравнение моментов для блока вместе с примыкающим к нему криволинейным отрезком нити.

$$M = J\beta$$



Здесь M – суммарный момент сил,
J – момент инерции,
β – угловое ускорение.
$T_2R - T_1R - M_{трения} - M_{сопр.возд.} = J_{блок+нить}\beta$
$M_{трения} = 0$ по усл. 4
$M_{сопр.возд.} = 0$ по усл. 5.
$J_{блок+нить} = 0$ по усл. 1 и 3

Отсюда получаем, что $T_1 = T_2$.
<u>Теорема доказана.</u>

<u>Примечание:</u> Можно видеть, что сформулирована теорема некорректно, т.к. условие 2 (нерастяжимость нити) не является необходимым.

Составим теперь итоговую таблицу, в которой показаны какие из условий использовались при получении уравнений из исходной системы.

У-ние	Усл. 1	Усл.2	Усл.3	Усл.4	Усл.5
(1)	–	–	–	–	+
(2)	–	–	–	–	+
(3)	–	+	–	–	–
(4) 1 этап	+	–	–	–	+
(4) 2 этап	+	–	+	+	+

Роль подсказки в преподавании

О подсказке

1. Ее надо анализировать с системной позиции
2. Подсказка – разновидность совета
3. Подсказка – педагогический прием (с ее помощью можно помочь учащимся выработать полезные навыки)
4. Подсказка учащихся друг другу – помеха в преподавании.
5. Подсказку следует дозировать (знать меру!)
6. Научиться дозировке – очень трудно.

Разновидности подсказки

1. Без участия преподавателя:
    a. Выбранная модель систем или явлений
    b. Обозначения величин в условиях задачи
    c. Отсутствие «лишних» данных
    d. Чертеж
    e. График
    f. Ответ к задаче
2. С участием преподавателя:
    a. «Опорные» фразы
       <u>Опорными</u> называются фразы, на которые опираются.
       <u>Принцип Ле Шателье Брауна (к правилу Ленца) </u>– последствия противодействуют причине.
       Короче: Все – назло!
    b. Наводящий вопрос
    c. Формулировки определений и законов
    d. Ироничные комментарии
    e. Показ основных этапов решения (типа «списывай с доски»)
    f. Подсказка, маскирующая подвох (задачи с «капканом»)

«Обратные» задачи

Задача №1: Уравнение кинематической связи

Прямая задача: Запишите уравнение кинематической связи для приращения координат грузов в системе блоков и грузов, представленной на рисунке?

Обратная задача: Нарисуйте систему из блоков и грузов, если уравнение кинематической связи для ускорений грузов $a_1 + a_2 = 0$ или $a_1 + 4a_2 = 0$

Задача №2: Усилитель

Прямая задача: Зная входной сигнал f(x) и коэффициент усиления K(x) определить выходной сигнал g(x)?

Обратная задача: Зная входной сигнал f(x) и выходной сигнал g(x) определить коэффициент усиления K(x)?

Задача №3: Система линз

Прямая задача: Имея систему линз, получить изображение объекта.

Обратная задача: Имея объект и его изображение, восстановить систему линз.

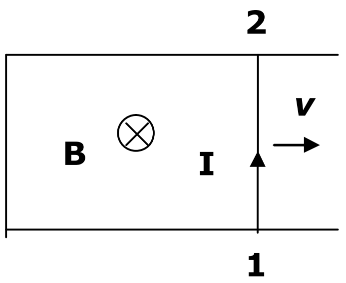
Задача №4: Сила ампера

Прямая задача: По двум соединенным через источник тока проводящим рельсам может двигаться проводящая перемычка. Имеется однородное магнитное, перпендикулярное плоскости конструкции, направление поля задано. Определить, куда будет двигаться перемычка.

Обратная задача: известно, куда двигается перемычка, а направление поля требуется определить.

Задачи с капканом

Капкан №1: Направление тока в источнике



Условие: Есть рельсы. Вектор магнитной индукции B направлен в доску. Пермычку 1-2 передвигаем вправо со скоростью *v*.

Вопрос: В какой точке 1 или 2 потенциал больше?

Ответ: Используя Николаевское правило правой руки (вектор магнитной индукции в ладонь, большой палец указывает в направлении действия силы, остальные пальцы показывают направление индукционного тока) определяем направление индукционного тока между точками 1 и 2. ***Ток течет от места с большим потенциалом к месту с меньшим потенциалом (только внутри источника тока!!!)***. 1-2 в нашем случае это внешний контур, поэтому начальная точка это 2, а конечная 1. Поэтому потенциал в точке 2 больше, чем потенциал в точке 1.

Капкан №2: Показания вольтметра

Вопрос: Каким должен быть ток через источник тока с э.д.с. ε=3 В и внутренним сопротивлением r=1 Ом, чтобы подключенный к его клеммам вольтметр показал 2 В?

Ответ:

Вольтметр показывает падение напряжения на нём самом

$$U_{вольтметра} = I \cdot R_{вольтметра}$$

Вольтметр всегда показывает суперпозицию двух вкладов:

1) Э.д.с. источника тока на участке (с соответствующей полярностью)
2) Падение напряжения R на этом участке (также с соответствующим знаком)

В задаче необходимо рассмотреть четыре возможных случая: два варианта направления тока через источник и два варианта для подключения вольтметра к источнику.

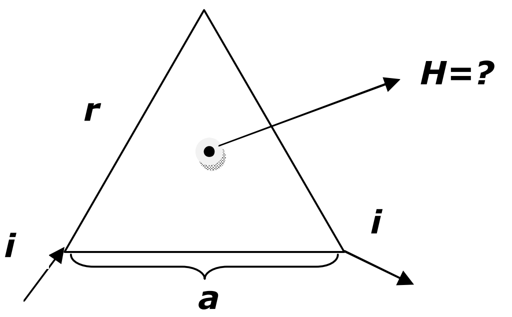
$$(1): U = +\varepsilon - I \cdot r$$
$$(2): U = -\varepsilon + I \cdot r$$
$$(3): U = +\varepsilon + I \cdot r$$
$$(4): U = -\varepsilon - I \cdot r$$

Исходя из условий задачи, оставляем из всех возможных решений только первые два (1) и (2).

В результате два ответа:

1) Первый ответ: Вольтметр подключён к э.д.с источника с соблюдением полярности. При этом ток должен течь туда, куда этого хочет источник тока и быть равным при этом 1 А.
2) Второй ответ: Вольтметр подключён к источнику тока без соблюдения полярности. При этом ток должен протекать так, как этого хочет источник тока и быть равным 5 А.

Капкан №3: Оценка ситуации



Ответ: H=0.

Капкан №4: Задача о машине Атвуда

Ответ: См. билет.7

Капкан №5: Задача об относительной влажности

Условие: Относительная влажность 40%. Изотермически уменьшаем объём в 3 раза. Сколько выпадет влаги?

Ответ: $\dfrac{40\% \times 3 - 100\%}{40\% \times 3} = \dfrac{1}{6}$

Мнемонические правила в общем курсе физики

Мнемоническим называется правило, основанное на придуманной закономерности.

«Трёхфазный ток»:

Конец – с концом

Угол – с углом

Конец – с углом

Угол – с концом

Уравнения переноса:

Диффузии $D = \frac{1}{3} \cdot \overline{v} \cdot \overline{\lambda}$ («зул»)

Вязкости $D = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \overline{v} \cdot \overline{\lambda}$ («зрул»)

Теплопроводности $D = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \overline{v} \cdot \overline{\lambda} \cdot c_V$ («зрулся»)

Харакири бывает розовым

$$\frac{n \cdot i \cdot k}{2} = \rho \cdot c_V$$

Фигуры Лисажу

Крайние дужки – близко к углам.

Вылезая из углов, соединяем соседей.

Мода

Мода у физиков всегда нормальная.

Большее из нормальных больше большего из парциальных, меньшее из нормальных меньше меньшего из парциальных.

Формула гироскопа

1) *Он-мужчина* - $\left[\vec{\Omega} \times \vec{N}\right] = \vec{M}$, где $\vec{\Omega}$ - угловая скорость прецессии гироскопа, а $\vec{N}$ - момент импульса
2) К вопросу о том, как направлена $\vec{\Omega}$ Ответ: «вдоль задней силы»

О преобразованиях Лоренца

В правой части формул либо штрих, либо минус.

Резонанс

Куда смещается – туда и задирается (ненулевой предел).

Произведение крайних (резонансных частот) равно квадрату средней.

О резонансном фильтре

КПРФ=0 (коэффициент пропускания резонансного фильтра равен нулю)

Поле

Куда направлено поле – там потенциал меньше.

Нормальная дисперсия

Если всё нормально, то красные - впереди.

Про правило левой и правой руки

Левая рука – для левой буквы,

Правая - для правой.

Законы для идеального газа: «Боксёрское страдание»

По лучу по вертикали,

По лучу по горизонтали,

По вертикали по лучу,

По горизонтали по лучу.

Решётки Браве

P(primitive)C(centrite)F(flachecentrite)I(innerncentrite) - пацифизм

Точечные дефекты (по Шотки и по Френкелю)

Френкель – всегда с нами.

Гипотеза Больцмана (в стихах):

В системе многих частиц

На каждую степень свободу

Приходится в среднем энергия

Пол - k – T.

По поводу машины Атвуда

Если раз, два, три, четыре, пять, то $T_1=T_2$.

По поводу спектра

Каждый охотник желает знать, где сидит фазан.

По поводу распределения заряда на каждой из пластин

1) На плоскостях, примыкающих к одному и тому же зазору, располагаются заряды равные по величине и противоположные по знаку
2) Сумма левых равна сумме правых

ТД квадрат

0) Инфузорство
1) Правило орбиталей
2) Правило добавок
3) Правило креста с орбиталями

4) Правило «раздвоенного хвоста»
5) Правило зигзага

Термодинамический квадрат

1. Введение

Мнемонические правила создают человеку дополнительные удобства. С их помощью легче запоминать имена, правила, формулы, номера телефонов и многое другое. Мы сами нередко придумываем себе на пользу мнемонические правила. Ведь мнемоническое правило - это именно правило, основанное на придуманной закономерности.

Пожалуй, единственный критерий, по которому выбирают "придуманную закономерность", это приносимая ею польза. Многим с детства знакома фраза: "Каждый охотник желает знать, где сидит фазан". С ее помощью легко можно назвать все семь цветов радуги в их естественной последовательности - по первым буквам слов в этой фразе: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Пользуясь этим правилом, никто не печалится тем, что к цветам радуги не имеют прямого отношения ни охотник, ни фазан. Важно, что сама фраза легко запоминается. И в этом - неотъемлемая часть пользы, которую она приносит.

Но бывают и не вполне удачные попытки, когда люди пытаются использовать свои ассоциации, чтобы придумать мнемоническое правило. Как тут не вспомнить грустно-комичную ситуацию, описанную А.П.Чеховым в рассказе "Лошадиная фамилия". Сколько версий "лошадиной" фамилии было испробовано - и все впустую!

Тому, кто изучает курс общей физики, многое приходится запоминать. В том числе и формулы. Их приходится заучивать, чтобы сэкономить время: ведь не будешь же выводить каждый раз нужную формулу "из первых принципов"! Хорошо, когда вместо длинного вывода формулы можно использовать удобное мнемоническое правило. Но мнемонических правил на тему о формулах в курсе общей физики не так уж много. Тем большего внимания они заслуживают. Как, впрочем, и попытки отыскания новых мнемонических правил.

Термодинамика - один из разделов курса общей физики, где встречается много однотипных формул. Эти формулы нередко так похожи одна на другую, что их легко перепутать. С другой стороны, сама однотипность этих формул - великолепная предпосылка к тому, чтобы попытаться найти общую для них "придуманную закономерность", с помощью которой можно было бы записать любую из этих формул или все их сразу.

Вниманию читателя предлагается в данной статье новая "конструкция" так называемого термодинамического квадрата. С его помощью, пользуясь мнемоническими правилами (они подробно излагаются ниже), можно записать сразу несколько семейств однотипных формул, в которые входят либо термодинамические потенциалы, либо их естественные переменные, либо те и другие одновременно. Сами формулы относятся к числу знаменитых - их часто используют при анализе равновесных процессов в термодинамических системах (метод термодинамических потенциалов) [Базаров И.П., 1991].

Идея объединить четыре термодинамических потенциала (вместе с их естественными переменными) общим "сюжетом" в виде термодинамического квадрата не является новой. Автору статьи известны две других версии такого квадрата [Радченко И.В., 1965; Стенли Г., 1973]. Обе они оказали влияние на предлагаемую здесь версию, но только в "деталях", ибо основной замысел явился результатом поиска именно удобной исходной "конструкции" квадрата - удобной прежде всего для тех, кто говорит и пишет на русском языке.

2. Основные формулы

Вспомним необходимые основные формулы.

В упомянутом выше методе термодинамических потенциалов чаще всего используются следующие четыре функции состояния системы, выбираемые в качестве термодинамических потенциалов: внутренняя энергия $\mathcal{U}$, энтальпия $\mathcal{H}$, свободная энергия $\mathcal{F}$и термодинамический потенциал Гиббса $\mathcal{Z}$. Каждый из потенциалов - функция надлежащим образом выбранных переменных

С формально-математической точи зрения, если бесконечно малый прирост *df* некоторой функции, например, от трех независимых переменных *f (x, y, z)* является полным дифференциалом, то, как известно,

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{y,z} dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_{x,z} dy + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)_{x,y} dz, \qquad (1)$$

причем

$$\left.\begin{array}{l} \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}, \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial x}, \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial y}. \end{array}\right\} \qquad (2)$$

Возможность введения названных выше четырех функций ($\mathcal{U}$, $\mathcal{H}$, $\mathcal{F}$ и $\mathcal{Z}$) для описания свойств термодинамических систем - следствие основного уравнения термодинамики равновесных процессов. В случае простых систем оно имеет вид:

$$T\,dS = d\mathcal{U} + p\,dV, \qquad (3)$$

где *T* - температура, *S* - энтропия системы, *p* - давление, *V* - объем. Для дальнейшего важно, что все пять величин, входящих в (3), являются функциями состояния.

Для внутренней энергии $\mathcal{U}$имеем:

$$d\mathcal{U} = T\,dS - p\,dV, \qquad (4)$$

а значит, согласно (1) и (2),

$$\mathcal{U} = \mathcal{U}(S, V), \qquad (5)$$

$$T = \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial S}\right)_V, \qquad (6)$$

$$-p = \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial V}\right)_S, \qquad (7)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V. \qquad (8)$$

Если взамен $\mathcal{U}$ввести в (4) другую функцию состояния - энтальпию

$$\mathcal{H} \equiv \mathcal{U} + pV, \qquad (9)$$

то, очевидно, будем иметь:

$$d\mathcal{H} = T\,dS + V\,dp, \qquad (10)$$

а значит,

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}\,(S, p), \qquad (11)$$

$$T = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial S}\right)_p, \tag{12}$$

$$V = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p}\right)_S, \tag{13}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p. \tag{14}$$

Аналогичным образом можно ввести в (4), заменяя $\mathcal{U}$, еще одну функцию состояния - свободную энергию

$$\mathcal{F} \equiv \mathcal{U} - TS, \tag{15}$$

в результате чего получим:

$$d\mathcal{F} = -S\,dT - p\,dV, \tag{16}$$

так что

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}(T, V), \tag{17}$$

$$-S = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial T}\right)_V, \tag{18}$$

$$-p = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial V}\right)_T, \tag{19}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V. \tag{20}$$

И, наконец, последний вариант: введем в (4) вместо $\mathcal{U}$термодинамический потенциал Гиббса

$$\mathcal{Z} \equiv \mathcal{U} - TS + pV. \tag{21}$$

Будем иметь тогда:

$$d\mathcal{Z} = -S\,dT + V\,dp, \tag{22}$$

откуда следует, что

$$\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(T, p), \tag{23}$$

$$-S = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial T}\right)_p, \tag{24}$$

$$V = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial p}\right)_T, \tag{25}$$

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p. \tag{26}$$

3. Мнемонические правила: немагнитные системы

Излагаемые здесь мнемонические правила имеют постулативный характер. Они, как и любые другие такие правила, преследуют одну-единственную цель: облегчить запоминание. В данном случае - запоминание (точнее, воспроизведение) всех приведенных выше формул термодинамики для простых систем.

<u>Нулевое правило:</u> "Инфузорство".

С помощью этого правила нетрудно изготовить основу всех последующих правил - так называемый термодинамический квадрат, не прибегая к помощи заранее заготовленных записей. (Как будет видно из дальнейшего, при определенной тренированности этот квадрат нетрудно воспроизвести и "в уме".)

Почему, собственно, "инфузорство" и что оно означает?

Если записать подряд латинскими буквами четыре термодинамических потенциала, которые встретились выше ($\mathcal{U}$, $\mathcal{H}$, $\mathcal{F}$, $\mathcal{Z}$), а вслед за ними, тоже подряд, все переменные, от которых они зависят (p, S, T, V), то можно получить такую последовательность из восьми латинских букв:

$$\mathcal{U}\,\mathcal{H}\,\mathcal{F}\,\mathcal{Z}\,p\ S\ T\ V. \qquad (27)$$

Порядок букв в этой абракадабре подобран с таким расчетом, чтобы, во-первых, получившееся "слово" легко запоминалось и, во-вторых, чтобы из него "вытекала" удобная "конструкция" термодинамического квадрата.

Прочитаем латинское "слово" (27) так, как если бы оно было написано по- русски. В тех случаях, когда нет такой буквы в русском алфавите, читаем ее как латинскую. Вот и получится: "инфузорство". Гласные добавлены здесь в середине и в конце "слова" из соображений благозвучия. "Инфузорство" легко запоминается хотя бы потому, что понятие "инфузория" (представитель простейших, одноклеточных животных) встречается нам впервые еще в школьном курсе биологии.

Теперь еще один "постулат": в первой букве (И) содержится "генетический код", а в нем - маршрут, которому надо следовать, записывая "слово" $\mathcal{U}\mathcal{H}\mathcal{F}\mathcal{Z}p\ S\ T\ V$, букву за буквой, и создавая тем самым термодинамический квадрат. На рис. 1 показана первая половина маршрута, вместе с "остановками", где надо оставлять первые четыре буквы - $\mathcal{U}$, $\mathcal{H}$, $\mathcal{F}$, $\mathcal{Z}$, а на рис. 2 - вторая часть маршрута - с "остановками" для p, S, T, V.

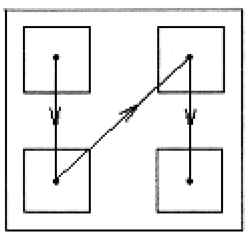


Рис. 1

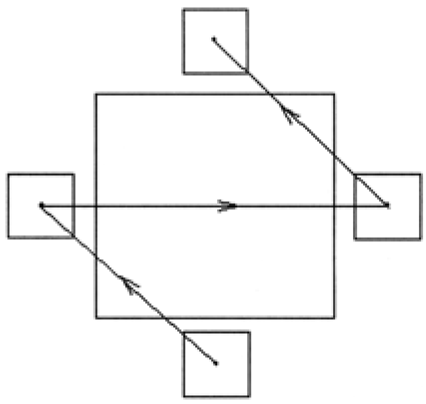


Рис. 2

Вообще-то, вторая половина маршрута - это не совсем буква "И". Это, скорее, повернутая (и перевернутая) буква "И". Но... с "генетическим кодом" не спорят!

На рис. 3 показано, что получилось в результате "заселения" термодинамического квадрата по указанному "рецепту". На "территории" самого квадрата разместились "привилегированные особы", в роли которых выступают термодинамические потенциалы - $\mathcal{U}$, $\mathcal{H}$, $\mathcal{F}$, $\mathcal{Z}$. За пределами квадрата - специально отведенные места для второстепенных "персонажей": переменных p, S, T, V.

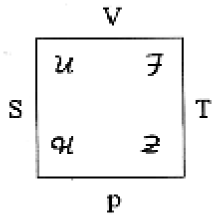


Рис. 3.

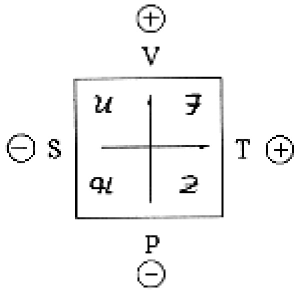


Рис. 4.

Термодинамический квадрат готов. Им уже вполне можно пользоваться. С его помощью можно получить все термодинамические формулы предыдущего раздела, с (4) по (26). Полезно добавить, однако, кое-какие удобства, как это сделано на рис. 4: стрелки-"оси" (они потребуются, правда, только в одном из последующих пяти правил) и знаки "плюс" и "минус" около переменных p, S, T, V (эти знаки пригодятся в ходе применения трех правил из пяти).

Завершая обсуждение "конструкции" термодинамического квадрата, заметим еще, что все четыре термодинамических потенциала имеют одинаковую размерность - такую же (Дж), как и произведения переменных (pV и TS), расположенных на концах стрелок.

Данное правило отнюдь не случайно считается здесь нулевым. Ведь оно не приносит никакой видимой пользы, а служит "всего лишь" для изготовления самого термодинамического квадрата (в котором эта польза и заключена).

<u>Первое правило:</u> "Правило орбиталей".

С его помощью легко вспомнить, в каких именно переменных каждый из термодинамических потенциалов является функцией состояния. "Конструкция" термодинамического квадрата такова, что каждый из потенциалов оказывается в окружении своих естественных переменных. Глядя на рис. 5, получаем:

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{U} &= \mathcal{U}(S,V), \\ \mathcal{H} &= \mathcal{H}(S,p), \\ \mathcal{F} &= \mathcal{F}(T,V), \\ \mathcal{Z} &= \mathcal{Z}(T,p). \end{aligned}\right\} \qquad (28)$$

Это - соответственно формулы (5), (11), (17) и (23).

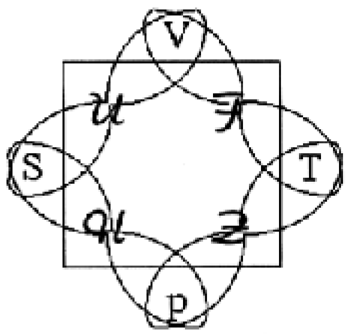


Рис. 5.

Из рис. 5 видна аналогия между функциональной связью термодинамического потенциала с его естественными переменными и валентными связями центрального атома с его ближайшими соседями - лигандами: в роли центрального атома выступает термодинамический потенциал, а его "лепестки", направленные в сторону естественных переменных этого потенциала,- как волновые функции валентных электронов. Отсюда и название правила: "правило орбиталей".

Второе правило: "Правило добавок".

Это правило помогает воспроизвести формулы, связывающие один термодинамический потенциал с другим. Именно в этом случае нужны стрелки- "оси", показанные на рис. 4. Потенциалы разнесены один относительно другого либо по горизонтальной "оси", либо по вертикальной. Есть удобная формулировка правила: "Кто больше - тому и добавка". А добавлять надо либо pV, либо TS - смотря по тому, вдоль какой оси разнесены "сравниваемые" потенциалы.

В соответствии с правилом, получаем, глядя на рис. 4:

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{H} &= \mathcal{U} + pV, \\ \mathcal{U} &= \mathcal{F} + TS, \\ \mathcal{H} &= \mathcal{Z} + TS, \\ \mathcal{Z} &= \mathcal{F} + pV. \end{aligned}\right\} \quad (29)$$

Эти четыре формулы находятся в полном соответствии с формулами (9), (15) и (21), отличаясь от них только "переменой мест слагаемых".

Третье правило: "Правило креста".

Это очередное мнемоническое правило помогает представить термодинамические потенциалы в виде полных дифференциалов. Поскольку рассматривается случай, когда у каждого термодинамического потенциала две естественных переменных, в правой части соответствующих формул для полных дифференциалов должно быть два слагаемых. Каждое из этих слагаемых должно, очевидно, представлять собой бесконечно малое приращение естественной переменной с соответствующим коэффициентом и знаком "плюс" или "минус", причем размерность слагаемого должна быть такая же, как и у потенциала (Дж). Эта последняя оговорка может служить наводящей идеей (и контролем) при поиске коэффициента. "Технологию" применения правила поясним на конкретном примере потенциала $\mathcal{U}(S,V)$. В правой части формулы для полного дифференциала $d\mathcal{U}$должны быть слагаемые, содержащие сомножители dS и dV. Так мы снова приходим к "орбиталям" (рис. 6). Сомножителями перед бесконечно малыми dS и dV должны быть, как это следует из (4), соответственно, величины $+T$ и $-p$. Из соображений размерности ясно, что "претендовать" на роль сомножителей перед dS и dV могут только температура T и давление p ($|d\mathcal{U}| = |TdS| = |pdV| =$ Дж). Что касается знаков "плюс" или "минус" перед T и p, они предусмотрены "конструкцией" термодинамического квадрата (см. рис. 6). Ассоциация с крестом обусловлена сочетанием сомножителей в формуле для $d\mathcal{U}$: $+T$ и dS дают одну "перекладину" креста, а $-p$ и dV - другую (рис. 6).

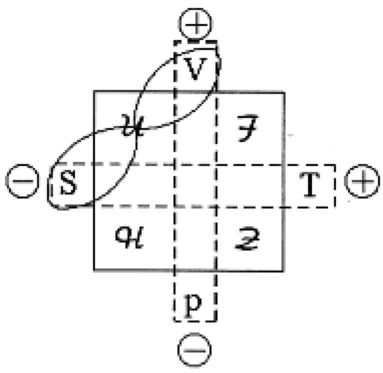


Рис. 6.

Пользуясь "правилом креста", запишем теперь всю четверку формул для полных дифференциалов:

$$\left.\begin{aligned} d\mathcal{U} &= +T\,dS - p\,dV,\\ d\mathcal{H} &= +T\,dS + V\,dp,\\ d\mathcal{F} &= -S\,dT - p\,dV,\\ d\mathcal{Z} &= -S\,dT + V\,dp. \end{aligned}\right\} \qquad (30)$$

Мы получили, таким образом, формулы (4), (10), (16) и (22).

<u>Четвертое правило:</u> "Правило раздвоенного хвоста".

С его помощью можно представить естественные переменные одного потенциала как частные производные других ("чужих") потенциалов. Поясним данный мнемонический "рецепт" на примере одной из четырех переменных - энтропии системы S.

Энтропия *S* входит в качестве "самостоятельного" сомножителя в формулы для полных дифференциалов $d\mathcal{F}(T,V)$ и $d\mathcal{Z}(T,p)$, причем в обоих случаях со знаком "минус", как это видно из (16) и (22). Значит, в соответствии с (1), величину *(-S)* можно представить с помощью формул (16) и (22) как частную производную - либо потенциала $\mathcal{F}(T,V)$, либо потенциала $\mathcal{Z}(T,p)$:

$$\left\{\begin{aligned} -S &= \left(\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial T}\right)_V,\\ -S &= \left(\frac{\partial\mathcal{Z}}{\partial T}\right)_p. \end{aligned}\right. \qquad (31)$$

Каждая из этих двух формул дает свой маршрут, которым связаны входящие в них четыре величины. Вот эти два маршрута (рис. 7): *(-S)*, *T*, $\mathcal{F}$<>, *V* и *(-S)*, *T*, $\mathcal{Z}$, *p*. Так мы приходим к еще одной "придуманной закономерности", основанной на ассоциации с "раздвоенным хвостом". Поскольку, как это видно из рис. 7, таких "хвостов" четыре и каждый из них "раздвоен", данное правило позволяет записать восемь различных формул, а именно:

$$\left.\begin{aligned} &\left\{\begin{aligned} -p &= \left(\frac{\partial\mathcal{U}}{\partial V}\right)_S,\\ -p &= \left(\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial V}\right)_T, \end{aligned}\right.\\ &\left\{\begin{aligned} -S &= \left(\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial T}\right)_V,\\ -S &= \left(\frac{\partial\mathcal{Z}}{\partial T}\right)_p, \end{aligned}\right.\\ &\left\{\begin{aligned} +T &= \left(\frac{\partial\mathcal{U}}{\partial S}\right)_V,\\ +T &= \left(\frac{\partial\mathcal{H}}{\partial S}\right)_p, \end{aligned}\right.\\ &\left\{\begin{aligned} +V &= \left(\frac{\partial\mathcal{H}}{\partial p}\right)_S,\\ +V &= \left(\frac{\partial\mathcal{Z}}{\partial p}\right)_T. \end{aligned}\right. \end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

(Фигурными скобками слева, как и в (31), выделены пары формул относящихся к одному и тому же "раздвоенному хвосту".) С помощью правила "раздвоенного хвоста" мы записали, таким образом, соответственно формулы (7), (19), (18), (24), (6), (12), (13) и (25).

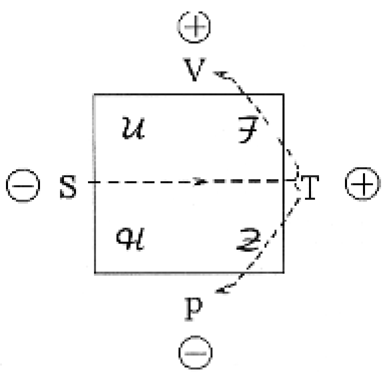


Рис. 7.

Пользуясь этим правилом, полезно помнить, для контроля, о правиле размерностей. Это позволит быстро и безошибочно выбрать в любом из восьми случаев одну из двух естественных переменных для частной производной данного термодинамического потенциала. Так, для размерностей величин в формулах (31) имеем:

[ST] = [$\mathcal{F}$] = [$\mathcal{Z}$] = Дж,

откуда и видно, что при записи формулы для *(-S)* надо брать производную функции $\mathcal{F}(T, V)$или функции $\mathcal{Z}(T, p)$непременно по *T* (а не по *V* или *p*).

Впрочем, и эти премудрости можно свести к мнемонике: на конце "хвоста" находится та естественная переменная данного термодинамического потенциала, которая "молчит", превращаясь в постоянную. Именно она-то и фигурирует в индексе для соответствующей частной производной. Так обстоит, например, дело в формулах (31). В индексе у частной производной в этих формулах фигурирует либо объем *V*, либо давление *p* - смотря по тому, какая из этих величин находится в конце выбранного "хвоста". С помощью рис. 7 (или рис. 4) нетрудно проследить за тем, что в конце каждого из восьми "хвостов" оказывается именно та переменная, которая находится в индексе у частной производной в соответствующей формуле.

<u>Пятое правило:</u> "Правило зигзага".

Это - последнее из обсуждаемых здесь мнемонических правил на тему термодинамического квадрата. С его помощью можно связать, в разных комбинациях, все четыре переменные - *p*, *S*, *T* и *V*, которые попарно выступают в роли естественных переменных термодинамических потенциалов. Сами потенциалы $\mathcal{U}$, $\mathcal{H}$, $\mathcal{F}$и $\mathcal{Z}$в итоговые формулы не входят. Что же касается формул, они являются следствием общего требования (2).

Поясним "правило зигзага" на примере термодинамического потенциала Гиббса $\mathcal{Z}(T, p)$. Согласно (26), величины *(-S)* и *(+V)*, входящие в формулу (22) для полного дифференциала $d\mathcal{Z}(T, p)$, образуют вместе с естественными переменными *T* и *p* маршрут (см. рис. 8): *(-S)*, *p*, *(+V)*, *T*. Именно в таком порядке нам необходимы "пункты" маршрута при написании формулы (26), когда формируются частные производные:

$$-\frac{\partial S}{\partial p} = +\frac{\partial V}{\partial T}.$$

В этой "заготовке" остается только добавить очевидные индексы, и мы получим формулу (26). Если поменять местами левую и правую части в равенстве (26), то получим второй маршрут, эквивалентный первому (на рис. 8 он показан штриховой линией): *(+V)*, *T*, *(-S)*, *p*. Ему соответствует "заготовка", равнозначная предыдущей,

$$+\frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{\partial S}{\partial p}.$$

Вот мы и получили два "зигзагообразных" маршрута, соответствующих одной формуле (26).

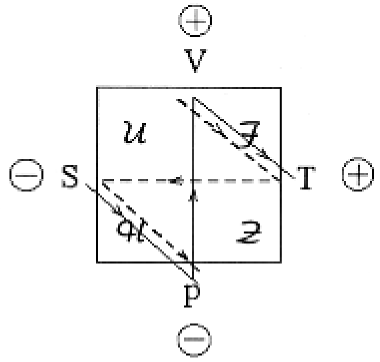


Рис. 8.

Применяя "правило зигзага", надо быть внимательным к знакам "плюс" и "минус" перед частными производными: эти знаки, указанные во всех четырех "пунктах" любого из маршрутов (см. рис. 8), надо "присуждать" только той переменной, которая оказывается в числителе.

Всего имеется, таким образом, восемь различных "зигзагов", которые попарно эквивалентны друг другу (как это было показано на примере двух "зигзагов", соответствующих потенциалу $\mathcal{Z}$). А вот и формулы, которые получаются, если применить "правило зигзага" (это - так называемые термодинамические уравнения Максвелла):

$$
\left.\begin{aligned}
+\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S &= -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V,\\
+\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S &= +\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p,\\
-\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T &= -\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V,\\
-\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T &= +\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p,
\end{aligned}\right\}
\begin{aligned}
\\
+\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_T &= +\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S,\\
+\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p &= -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T,\\
-\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V &= +\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S,\\
-\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V &= -\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T.
\end{aligned}
\qquad (33)
$$

Первые четыре формулы совпадают соответственно с (8), (14), (20) и (26). Четыре последних можно рассматривать как результат перестановки местами левых и правых частей в первых четырех формулах.

4. Обобщение на случай магнитных систем

Пять мнемонических правил, изложенных выше, легко обобщаются на случай магнитных систем. Надо всего лишь сделать двойную замену в исходном термодинамическом квадрате (рис. 4): $p \to H,\ V \to (-M)$.

Физический смысл такой замены связан с тем, что в роли аналога работы системы $dA = pdV$ в (3) выступает величина $dW = - HdM$ (H - напряженность магнитного поля, M - магнитный момент системы). Иначе говоря, в случае магнитных систем основное уравнение термодинамики равновесных процессов представляется в виде

$$T\,dS = d\mathcal{U} - H\,dM. \qquad (34)$$

Если рассматривать напряженность поля H в (34) как аналог давления p в (3), то знак "минус" в правой части уравнения (34) естественно приписывать магнитному моменту M, что и приводит к указанной выше двойной замене в "конструкции" термодинамического квадрата (рис. 9).

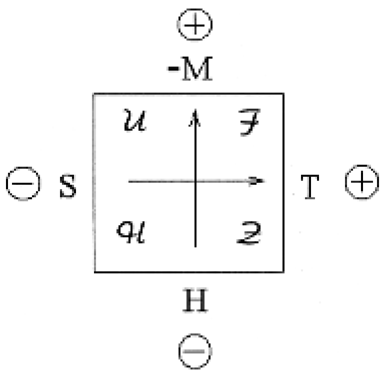


Рис. 9.

Воспользуемся теперь последовательно всеми пятью мнемоническими правилами - на сей раз для получения термодинамических соотношений для случая магнитной системы.

"Правило орбиталей" дает в общем виде функциональную связь каждого из термодинамических потенциалов с его естественными переменными (см. рис. 9):

$$\left.\begin{array}{l} \mathcal{U} = \mathcal{U}\,(S, M)\,, \\ \mathcal{H} = \mathcal{H}\,(S, H)\,, \\ \mathcal{F} = \mathcal{F}\,(T, M)\,, \\ \mathcal{Z} = \mathcal{Z}\,(T, H)\,. \end{array}\right\} \qquad (35)$$

С помощью "правила добавок" (и рис. 9) запишем формулы, устанавливающие связь термодинамических потенциалов магнитной системы друг с другом:

$$\left.\begin{array}{l} \mathcal{H} = \mathcal{U} + H \cdot (-M)\,, \\ \mathcal{U} = \mathcal{F} + TS, \\ \mathcal{H} = \mathcal{Z} + TS, \\ \mathcal{Z} = \mathcal{Z} + H \cdot (-M)\,. \end{array}\right\} \qquad (36)$$

Пользуясь "правилом креста" (см. рис. 9), представляем термодинамические потенциалы в виде полных дифференциалов:

$$\left.\begin{array}{l} d\mathcal{U} = +T\,dS - H\,d\,(-M)\,, \\ d\mathcal{H} = +T\,dS + (-M)\;dH, \\ d\mathcal{F} = -S\,dT - H\,d\,(-M)\,, \\ d\mathcal{Z} = -S\,dT + (-M)\;dH. \end{array}\right\} \qquad (37)$$

Применим теперь "правило раздвоенного хвоста" (и рис. 9), чтобы выразить естественные переменные в виде частных производных от "чужих" термодинамических потенциалов:

$$\begin{array}{l} \left\{\begin{array}{l} -H = \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial(-M)}\right)_S, \\ -H = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial(-M)}\right)_T, \end{array}\right. \\ \left\{\begin{array}{l} -S = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial T}\right)_M, \\ -S = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial T}\right)_H, \end{array}\right. \\ \left\{\begin{array}{l} +T = \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial S}\right)_M, \\ +T = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial S}\right)_H, \end{array}\right. \\ \left\{\begin{array}{l} -M = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H}\right)_S, \\ -M = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial H}\right)_T. \end{array}\right. \end{array} \qquad (38)$$

Наконец, воспользуемся "правилом зигзага", чтобы получить термодинамические уравнения Максвелла для магнитной системы (см. рис. 9):

$$\left.\begin{aligned}
+\left(\frac{\partial T}{\partial(-M)}\right)_S &= -\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_M, \\
+\left(\frac{\partial T}{\partial(-H)}\right)_S &= +\left(\frac{\partial(-M)}{\partial S}\right)_H, \\
-\left(\frac{\partial S}{\partial(-M)}\right)_T &= -\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_M, \\
-\left(\frac{\partial S}{\partial(-H)}\right)_T &= +\left(\frac{\partial(-M)}{\partial T}\right)_H,
\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}
+\left(\frac{\partial(-M)}{\partial S}\right)_H &= +\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_S, \\
+\left(\frac{\partial(-M)}{\partial T}\right)_H &= -\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T, \\
-\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_M &= +\left(\frac{\partial T}{\partial(-M)}\right)_S, \\
-\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_M &= -\left(\frac{\partial S}{\partial(-M)}\right)_T.
\end{aligned}\right\} \quad (39)$$

Нетрудно убедиться в том, что полученные с помощью мнемоники пять семейств формул для магнитной системы (35), (36), (37), (38) и (39) аналогичны соответствующим семействам формул (28), (29), (30), (32) и (33).

5. Случай трех переменных

Два рассмотренных выше случая простых систем, немагнитных (пп. 2 и 3) и магнитных (п. 4), можно объединить, записав основное уравнение термодинамики равновесных процессов в виде:

$$T\,dS = d\mathcal{U} + p\,dV - H\,dM. \quad (40)$$

В отличие от (3) и (34), здесь принято во внимание, что изменяться могут как *p* и *V*, так и *H* и *M*. Поскольку внутренняя энергия системы $\mathcal{U}$- функция состояния, величина $d\mathcal{U}$- полный дифференциал, а естественными переменными для $\mathcal{U}$являются, согласно (40), три величины - *S*, *V* и *M*. Так мы приходим к случаю, когда каждый из термодинамических потенциалов системы является функцией не двух, а трех переменных (в не повторяющихся, как и ранее, комбинациях).

Наша задача сейчас - внести изменения в "конструкцию" термодинамического квадрата в соответствии с уравнением (40).

Прежде всего убедимся в том, что функциональную связь четырех термодинамических потенциалов с их естественными переменными в общем виде можно представить следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
\mathcal{U} &= \mathcal{U}\,(S, V, M)\,, \\
\mathcal{H} &= \mathcal{H}\,(S, p, H)\,, \\
\mathcal{F} &= \mathcal{F}\,(T, V, M)\,, \\
\mathcal{Z} &= \mathcal{Z}\,(T, p, H)\,.
\end{aligned}\right\} \quad (41)$$

С этой целью введем, по аналогии с (29) и (36), следующие пересчетные соотношения между потенциалами:

$$\left.\begin{aligned}
\mathcal{H} &= \mathcal{U} + pV + H\,(-M)\,, \\
\mathcal{U} &= \mathcal{F} + TS, \\
\mathcal{H} &= \mathcal{Z} + TS, \\
\mathcal{Z} &= \mathcal{F} + pV + H\,(-M)\,.
\end{aligned}\right\} \quad (42)$$

Если воспользоваться этими формулами, то с помощью основного уравнения (40) можно получить выражения для полных дифференциалов всех четырех термодинамических потенциалов:

$$\left.\begin{aligned}
d\mathcal{U} &= +T\,dS - p\,dV - H\,d(-M),\\
d\mathcal{H} &= +T\,dS + V\,dp + (-M)\,dH,\\
d\mathcal{F} &= -S\,dT - p\,dV - H\,d(-M),\\
d\mathcal{Z} &= -S\,dT + V\,dp + (-M)\,dH.
\end{aligned}\right\} \tag{43}$$

Формулы (43) подтверждают, таким образом, справедливость формул (41).

Трех семейств формул - (41), (42) и (43) - вполне достаточно, чтобы убедиться, что нужная нам версия термодинамического квадрата может быть получена как "суперпозиция" прежних двух - "немагнитной" (рис. 4) и "магнитной" (рис. 9). Результат такого наложения показан на рис. 10. Видно, что от любого из прежних двух квадратов этот новый отличается лишь "косметическими" поправками: к четырем переменным добавлено еще две, причем обе - на концах вертикальной "оси".

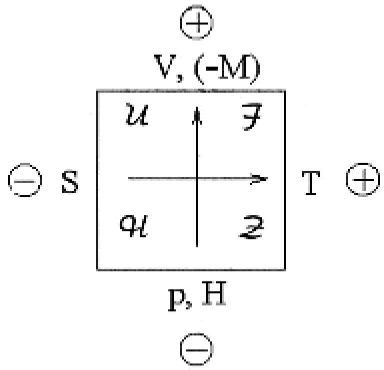


Рис. 10.

Эта новая "конструкция" термодинамического квадрата позволяет оставить в силе, с некоторыми оговорками, все пять правил, описанных выше в пп. 3 и 4.

Так, семейства формул (41), (42) и (43) легко получаются с помощью "правила орбиталей", "правила добавок" и "правила креста".

Применяя "правило орбиталей", обратим внимание на то, что каждый из потенциалов находится в окружении не двух, как ранее, а трех своих переменных: с одной стороны от него находятся либо *S*, либо *T*, а с другой - либо *p* и *H*, либо *V* и *(-M)*.

Так называемых "добавок" в ходе применения "правила добавок" может оказаться на сей раз не одна, а две. А именно: если "сравниваются" потенциалы, расположенные вдоль вертикальной "оси" ($\mathcal{H}$ и $\mathcal{U}$или же $\mathcal{Z}$и $\mathcal{F}$), то, как это видно из рис. 10, а также из формул (42), "добавок" должно быть две - "немагнитная" *pV* и "магнитная" *H*(-M)*.

Поскольку переменных у каждого потенциала три, в ходе применения "правила креста" должны сформироваться не два, как ранее, а три вклада в каждый из полных дифференциалов. Этому во всех четырех случаях соответствует удвоение вертикальной части "крестовины": в формулах (43), получаемых с помощью "правила креста", этим двум вертикальным участкам маршрута соответствуют второе и третье слагаемые.

По аналогии с "добавками" и "крестовиной", вдвое больше будет и тех "раздвоенных хвостов", которые расположатся вертикально на рис. 10. Значит, если в случае простой системы (рис. 4 или рис. 9) полное число "раздвоенных хвостов" было равно четырем, то в данном случае (рис. 10) их будет шесть. Каждый из них дает две различные формулы (выражающие одну из переменных как частную производную от любого из двух "дальних" от нее потенциалов), а потому общее число таких формул будет равно двенадцати. Вот эти формулы (мы их записываем с помощью "правила раздвоенного хвоста"):

$$\left.\begin{array}{l}
\begin{cases} -p = \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial V}\right)_{S,M}, \\ -p = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial V}\right)_{T,M}, \end{cases} \\
\begin{cases} -H - \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial (-M)}\right)_{S,V}, \\ -H = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial (-M)}\right)_{T,V}, \end{cases} \\
\begin{cases} -S = \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial T}\right)_{V,M}, \\ -S = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial T}\right)_{p,H}, \end{cases} \\
\begin{cases} +T = \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial S}\right)_{V,M}, \\ +T = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial S}\right)_{p,H}, \end{cases} \\
\begin{cases} +V = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p}\right)_{S,H}, \\ +V = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial p}\right)_{T,H}, \end{cases} \\
\begin{cases} -M = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H}\right)_{S,p}, \\ -M = \left(\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial H}\right)_{T,p}. \end{cases}
\end{array}\right\} \qquad (44)$$

Правильность этих формул легко проверить с помощью выражений (43) для полных дифференциалов.

Обратимся, наконец, к "правилу зигзага" - последнему из пяти мнемонических правил. Судя по "конструкции" термодинамического квадрата (рис. 10), число зигзагообразных маршрутов, соединяющих каждый раз по четыре переменных, должно быть существенно больше, чем в двух уже рассмотренных более простых случаях (ср. с рис. 4 и 9). Среди всех маршрутов надо выбрать, как и ранее, только такие, которые дают не повторяющиеся между собой термодинамические уравнения Максвелла. Кроме того, надо выяснить заранее (чтобы внести необходимые указания в процедуру применения "правила зигзага"), действительно ли все маршруты и на сей раз оказываются зигзагообразными.

Подсказка "сидит" в формулах для полных дифференциалов (43). Из этих формул видно, во-первых, что каждый из дифференциалов дает три уравнения Максвелла для смешанных производных - по "рецепту" (2), так что всего должно быть двенадцать различных уравнений Максвелла. Вот они, согласно (43):

$$\left.\begin{array}{l}
\begin{cases} +\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{S,M} = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_{V,M}, \\ +\left(\frac{\partial T}{\partial (-M)}\right)_{S,V} = -\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_{V,M}, \\ -\left(\frac{\partial p}{\partial (-M)}\right)_{S,V} = -\left(\frac{\partial H}{\partial V}\right)_{S,M}, \end{cases} \\
\begin{cases} +\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{S,H} = +\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_{p,H}, \\ +\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_{S,p} = +\left(\frac{\partial (-M)}{\partial S}\right)_{p,H}, \\ +\left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)_{S,p} = +\left(\frac{\partial (-M)}{\partial p}\right)_{S,H}, \end{cases} \\
\begin{cases} -\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{T,M} = -\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{V,M}, \\ -\left(\frac{\partial S}{\partial (-M)}\right)_{T,V} = -\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{V,M}, \\ -\left(\frac{\partial p}{\partial (-M)}\right)_{T,V} = -\left(\frac{\partial H}{\partial V}\right)_{T,M}, \end{cases} \\
\begin{cases} -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_{T,H} = +\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,H}, \\ -\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T,p} = +\left(\frac{\partial (-M)}{\partial p}\right)_{p,H}, \\ +\left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)_{T,p} = +\left(\frac{\partial (-M)}{\partial p}\right)_{T,H}. \end{cases}
\end{array}\right\} \qquad (45)$$

Во-вторых, восьми из этих уравнений соответствуют маршруты в виде "зигзага", а четырем (они отмечены звездочкой) - маршруты по вертикали: либо "взлет - падение - взлет", либо "падение - взлет - падение". Выходит, название пятого правила надо менять? Нет, вовсе не обязательно! Дело в том, что все четыре вертикальных маршрута можно трактовать как схлопнувшиеся "зигзаги". Иначе говоря, все двенадцать маршрутов - это "зигзаги": либо развернутые, либо "выродившиеся" в вертикальный отрезок прямой.

Итак, всего должно быть двенадцать "зигзагов", дающих не повторяющиеся термодинамические уравнения Максвелла. Для простоты запоминания всех двенадцати маршрутов (и для их упорядочения) полезно разбить их на три группы, по четыре "зигзага" в каждой.

Первую группу пусть составят "зигзаги", соответствующие "немагнитному" случаю, который рассмотрен в п. 3. Это даст нам четыре равенства, находящиеся во главе троек формул, выделенных в (45). От соответствующих формул (33) из п. 3 эти равенства отличаются только тем, что в них добавляется в индексе магнитная переменная, встречающаяся в ходе зигзагообразного маршрута,- та, которая соответствует двум немагнитным (по "правилу орбиталей").

Во вторую группу пусть войдут "зигзаги", рассмотренные во втором простом случае - "магнитном" (п. 4). Этим "зигзагам" соответствуют вторые равенства в упомянутых тройках формул в (45). Они отличаются от аналогичных четырех равенств в (39) наличием второго индекса, "немагнитного" на сей раз (он должен соответствовать "правилу орбиталей").

Наконец, третью группу составят "зигзаги", "выродившиеся" в вертикальный отрезок. Им соответствуют последние равенства в тройках формул, выделенные звездочкой в (45). Эти равенства, как и предыдущая четверка, связывают друг с другом две "немагнитные" переменные с двумя "магнитными": p, V, H и *(-M)*. Хотя вертикальных маршрутов только два ("вверх - вниз - вверх" и "вниз - вверх - вниз"), формул получается вдвое больше - две пары. Отличие в каждой паре одинаковых с виду формул - только в индексе, куда добавляется "немагнитная" переменная, взятая либо слева от вертикали квадрата *(S)*, либо справа от нее *(T)* - в соответствии с "правилом орбиталей". В справедливости сказанного можно убедиться, сравнивая в (45) третье равенство с девятым, а также шестое с двенадцатым.

6. Заключение

Как и любая другая мнемоника, изложенные выше "правила" - не более чем совокупность вспомогательных приемов. Правда, приемы эти дают большие преимущества тому, кто ими пользуется. Прежде всего - большой выигрыш во времени. Чтобы использовать термодинамический квадрат как подручное средство, вовсе не нужно иметь при себе "шпаргалку" с готовым квадратом: "инфузорство" легко запоминается, а вместе с ним нетрудно вспомнить и всю нехитрую рецептуру. Термодинамический квадрат, вместе с "правилами", связанными с ним, вносит элементы игры в сухую и строгую науку, а разве это не важно при серьезном знакомстве с нею?

Литература

- *Базаров И.П.* Термодинамика. 4-е изд. М.: Высшая школа, 1991.

- *Радченко И.В.* Молекулярная физика. М.: Наука, 1965, стр. 198.

- *Стенли Г.* Фазовые переходы и критические явления. М.: Мир, 1973, стр. 72.

Подготовка преподавателя к занятиям

1) Всегда – в режиме поиска
2) Нужен настрой
3) Должен быть «сценарий»
4) Особо важное:
    a) Отбор формулировок (правильные и неправильные)
    b) Отбор задач
        i) Типовых
        ii) Качественных (не требующих вычислений)
        iii) С капканом
        iv) С графиками и чертежами
        v) С избытком и недостатком данных
    c) Диктовать (в том числе и по просьбе)
    d) Уметь решать задачи на доске, <u>не заглядывая</u> в конспект
5) Критерии отбора задач
    a) По теме!

   b) В своей совокупности – должны раскрыть тему
   c) Желательно приятных (задачи)
   d) Меньше выкладок!
   e) Не забыть о «знаменитых» задачах
6) Составить список контрольных вопросов (в среднем 120-150 шт. по каждому разделу физики)
7) Вести рейтинг
8) Не забыть о четырех разновидностях вопросов - 1) что такое?; 2) Приведите пример; 3) Как соотносятся?; 4) Сколько?
9) Отбор «опорных» фраз
10) Наметить, кого из учащихся выделить и почему? Возможен экспромт по ходу дела.
11) Подготовить материал «про запас» (задачи, фрагменты семинара, отступления от темы)
12) Подготовить очередную порцию информации для учащихся
13) Каждый раз накануне, особенно в первые годы преподавания – репетиция
14) «Вывод должен сидеть в руке»
15) Подготовить д/з: сколько задач, на какую тему, из какого задачника, добавить свои
16) Объявить последние новости о рейтинге (если таковые имеются)
17) Сценарий семинара:
   a) реальное число сценариев - бесконечно
   b) между всеми возможными сценариями должно быть нечто общее
   c) типовой сюжет:
      i) Здравствуйте…
      ii) Садитесь, пожалуйста…
      iii) Запишем…тема сегодняшнего занятия, семинара, урока…
      iv) Вспомним самое важное (далее опрос)
      v) Контрольный опрос
      vi) Решение задач (нумеровать на доске)
      vii) огласить д/з
      viii) организационные вопросы (собрать тетради, напоминания, объявления)
   d) Важное
      i) Не сидеть
      ii) искать типовые ошибки
      iii) повторять «опорные» фразы (преподаватель - проповедник)
      iv) помнить о дозировке подсказок
      v) Помнить о трудных учениках (и об опорных лицах)
      vi) Не задерживать после звонка!

Подготовка преподавателя к занятиям (переструктурированный вариант)

1. Общие замечания
   a. Всегда – в режиме поиска
   b. Нужен настрой
   c. Уметь решать задачи на доске, <u>не заглядывая</u> в конспект («Вывод должен сидеть в руке»)
   d. Диктовать (в том числе и по просьбе)
   e. Вести рейтинг
2. Подготовка курса
   a. Отбор формулировок (правильные и неправильные) (важно!)
   b. Отбор задач (важно!)
      i. Типовых

        ii. Качественных (не требующих вычислений)
        iii. С капканом
        iv. С графиками и чертежами
        v. С избытком и недостатком данных
    c. Отбор «опорных» фраз (важно!)
    d. Составить список контрольных вопросов (в среднем 120-150 шт. по каждому разделу физики)
3. Подготовка к семинару
    a. Должен быть «сценарий»
    b. Подготовить очередную порцию информации для учащихся
    c. Подготовить задачи, отобранные по следующим критериям
        i. По теме!
        ii. В своей совокупности – должны раскрыть тему
        iii. Желательно приятных (задачи)
        iv. Меньше выкладок!
        v. Не забыть о «знаменитых» задачах
    d. Подготовить материал «про запас» (задачи, фрагменты семинара, отступления от темы)
    e. Подготовить д/з: сколько задач, на какую тему, из какого задачника, добавить свои
    f. Каждый раз накануне, особенно в первые годы преподавания – репетиция
4. Сценарий семинара
    a. Здравствуйте…
    b. Садитесь, пожалуйста…
    c. Запишем…тема сегодняшнего занятия, семинара, урока…
    d. Вспомним самое важное (далее контрольный опрос)
    e. Решение задач (нумеровать на доске)
    f. Огласить д/з
    g. Организационные вопросы (собрать тетради, напоминания, объявления, рейтинг)
5. Важное на семинаре
    a. Не забыть о четырех разновидностях вопросов - 1) Что такое?; 2) Приведите пример; 3) Как соотносятся?; 4) Сколько?
    b. Не сидеть
    c. искать типовые ошибки
    d. повторять «опорные» фразы (преподаватель - проповедник)
    e. помнить о дозировке подсказок
    f. Помнить о трудных учениках (и об опорных лицах)
    g. Не задерживать после звонка!

Работа над диссертацией

Вопросы «технологии»

1. Вместо предисловия
    a. Главное назначение любой технологии – изыскание путей экономии времени, ресурсов и т.п.
    b. Данная технология имеет главной своей задачей экономию времени.
    c. Компьютеры все могут – не о них речь.
    d. Системный подход – суть предлагаемой рецептуры.
2. Начальные условия
    a. Есть карандашный вариант темы диссертации.

  b. Имеются все необходимые публикации (или вот-вот появятся).
  c. Известно, в каком совете предстоит защита (*необходимо знать неписанные правила данного совета и учитывать характерные особенности входящих него людей*).
  d. Известно, каковы ресурсы времени.
  e. Имеются прототипы всех рисунков. (*Из курсовых, диплома, журнальных статей. Подойдут даже наброски*).
3. Порядок действий
  a. Формулировка предметов защиты. *(Хотя бы один действительно новый и ценный результат. Самое сложное место,)*
  b. Поиск названия (взамен карандашного).
  c. Написание последнего раздела: «Заключение. Основные результаты и выводы».
  d. Разработка структуры.
  e. Написание кратких итогов к каждой главе.
  f. Написание текста (желательно в порядке оглавления).
4. О названии диссертации
  a. Оно не должно быть громоздким или мудреным.
  b. Желательно – без скобок.
  c. Не должно начинаться с «о».
  d. Помнить: слова в кавычках вносят разнообразие.
  e. В названии должен угадываться основной результат работы.
  f. Надо придумать несколько вариантов названия *(обычно седьмой становится финальным).*
  g. Дать им «отстояться».
  h. Показать варианты тем, кому доверяешь.
5. О заключении
  a. Его нужно структурировать: разбить на нумерованные пункты, а их – на подпункты. *(Физики должны структурировать все!)*
  b. Первый пункт – обзорного характера *(самое сложное место!)*.
  c. Каждый из пунктов – как большая теорема (она должна быть доказана в тексте диссертации).
  d. Содержание и порядок следования пунктов должны соответствовать структуре оглавления.
6. О кратких итогах
  a. Это – последний параграф каждой из глав.
  b. Краткие итоги выступают в роли заключения каждой из глав.
  c. Каждый из нумерованных пунктов – как маленькая теорема (он должен быть доказан в тексте главы).
  d. Содержание и порядок следования пунктов должен соответствовать структуре главы.
  e. Взятые в своей совокупности краткие итоги всех глав представляют собой развернутое заключение диссертации.
  f. Краткие итоги, если они хорошо написаны, создают большое удобство для читателя, пробуждают чувство симпатии к автору (в том числе и у оппонента).
7. О разработке структуры
  a. Структура – это совокупность логически связанных составных частей различной иерархической значимости.
  b. Иерархия этих частей – по принципу «мал мала меньше»:
    i. главы (в том числе введение, заключение и список литературы);
    ii. параграфы;
    iii. пункты в составе параграфа;
    iv. подпункты.
  c. Внешний вид оглавления должен соответствовать этой иерархии *(использовать отступы!).*

d. Объемы всех частей должны иметь разумную пропорцию.
e. В оглавлении отмечают составные части не ниже пункта.
f. Способ нумерации частей должен отражать их иерархическую значимость *(лучше всего использовать нумерацию, к примеру,1.2 для параграфа и 2.3.1 для пункта)*.

8. О пропорциях
    a. Исходные постулаты:
        i. Об объеме диссертации – примерно 100 страниц чистого текста.
        ii. О количестве рисунков – примерно 70.
        iii. О сроках написания текста – примерно месяц.
    b. «Долька» - это параграф главы. Надо посчитать все дольки и оценить размер каждой (размер дольки = объем диссертации/количество долек).
9. О процессе написания
    a. Начать с изготовления графика (количество готовых страниц от времени) и таблицы (аналогичного содержания).
    b. Писать лучше в соответствии с оглавлением.
    c. Поменьше отвлекаться на посторонние дела (беречь стереотип!).
    d. Использовать готовые файлы *(курсовые, диплом, статьи и т.п.).*
    e. Каждый день фиксировать результат (на графике и в таблице).
    f. Изготовить текст можно за месяц.
10. Типичные ошибки
    a. «Литературный обзор». *(Литературно пишут литераторы. Эта глава должна иметь проблемное название и называться, например, «… (по материалам литературы)».)*
    b. «Выводы» не являются выводами. *(К примеру, выражение «Проведены исследования…» не является выводом.)*
    c. Название диссертации не соответствует содержанию.
    d. Бестактности в роли благодарности. *(Например, «Спасибо друзьям, что поддерживали меня во время измерений». Благодарности вообще не нужно включать в оглавление.)*

Некоторые определения

1. **Законы динамики** – это законы Ньютона плюс законы, описывающие индивидуальные свойства сил (например, закон Ньютона для вязкого трения, закон Амонтона-Кулона для сухого трения).
2. **Разновидности сил трения**:
    a) Сухое трение
        i) Покоя
        ii) Скольжения
        iii) Сцепления при качении (мгновенного покоя)
        iv) Качения
    b) Вязкое трение
3. **Законы сохранения в механике**

	Инерциальные системы отсчета	*Неинерциальные системы отсчета*
ЗСИ	Суммарный импульс системы тел или материальных точек сохраняется неизменным, если система является замкнутой.	Суммарный импульс системы тел или материальных точек сохраняется неизменным, если равнодействующая всех внешних сил и сил инерции равна нулю.
ЗСМИ относительно оси	Суммарный момент импульса	Суммарный момент импульса

	системы тел или материальных точек относительно некоторой оси сохраняется неизменным, если суммарный момент всех внешних сил относительно этой оси равен нулю.	системы тел или материальных точек относительно некоторой оси сохраняется неизменным, если суммарный момент всех внешних сил и сил инерции относительно этой оси равен нулю.
ЗСМИ относительно точки	Суммарный момент импульса системы тел или материальных точек относительно некоторой точки сохраняется неизменным, если суммарный момент всех внешних сил относительно этой точки равен нулю.	Суммарный момент импульса системы тел или материальных точек относительно некоторой точки сохраняется неизменным, если суммарный момент всех внешних сил и сил инерции относительно этой точки равен нулю.
ЗСМЭ	Механическая энергия системы тел сохраняется неизменной, если суммарная работа всех внешних сил и сил трения внутри системы равна нулю.	Механическая энергия системы тел сохраняется неизменной, если суммарная работа всех внешних сил, сил трения внутри системы и сил инерции равна нулю.

4. **Виды сил инерции**
    a) Переносной силой инерции называется сила, равная произведению массы материальной точки на взятое с обратным знаком ее переносное ускорение. Частный случай - центробежная сила инерции.
    b) Кориолисовой силой инерции называется сила, равная произведению массы материальной точки на взятое с обратным знаком ее кориолисово ускорение.
5. **Начала термодинамики**
    0. Если система *A* находится в термодинамическом равновесии с системой *B*, а та, в свою очередь, с системой *C*, то система *A* находится в равновесии с *C*, температуры их при этом равны.
    1. Закон сохранения энергии для тепловых процессов
    2. (по Томпсону) Невозможен такой циклический процесс, единственным результатом которого было бы превращение нацело в механическую работу тепла, взятого у какого-то одного тела.
    2. (по Клаузиусу) Невозможен такой циклический процесс, единственным результатом которого была бы передача тепла от менее нагретого к более нагретому телу.
    3. Абсолютный ноль температур недостижим.
6. **Термодинамические потенциалы**
    a) Внутренняя энергия вводится через дифференциал из 1-ого начала термодинамики: $dU=TdS-pdV$.
    b) Остальные потенциалы записываются с помощью термодинамического квадрата (правило добавок).
7. **Фазовые переходы (классификация по Эренфесту)**
    a) Фазовым переходом первого рода по Эренфесту называется такой переход, при котором потенциал Гиббса термодинамической системы непрерывен, а его первые производные по естественным переменным терпят разрыв.
    Примеры:
        i) переходы между агрегатными состояниями вещества.
    b) Фазовым переходом второго рода по Эренфесту называется такой переход, при котором потенциал Гиббса термодинамической системы и его первые производные по естественным переменным непрерывны, а вторые терпят разрыв.
    Примеры:
        i) переход парамагнетик-ферромагнетик или парамагнетик-антиферромагнетик;

ii) переход металлов и сплавов в состояние сверхпроводимости;
iii) переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние;
iv) переход аморфных материалов в стеклообразное состояние.

8. **Коэффициенты переноса**
   a) Диффузия: $D = \frac{1}{3}\bar{v}\bar{\lambda}$ (зул)
   b) Вязкое трение: $\eta = \frac{1}{3}\rho\bar{v}\bar{\lambda}$ (зрул)
   c) Теплопроводность: $\kappa = \frac{1}{3}\rho\bar{v}\bar{\lambda}c_v$ (зрулся)
9. **Классификация** – это разделение предметов, понятий и т.п. по классификационному признаку.
10. **Законы электростатики**
   a) Закон Кулона
   b) Принцип суперпозиции электрических сил – электрические силы действуют независимо друг от друга.
   c) Закон сохранения заряда – в изолированной системе алгебраическая сумма зарядов сохраняется неизменной.
11. **Основные положения теории электромагнетизма (по Максвеллу)**
   a) Всякое изменение электрического поля вызывает вихревое магнитное поле.
   b) Всякое изменение магнитного поля вызывает вихревое электрическое поле.
12. **Законы геометрической оптики**
   a) Закон прямолинейного распространения света: в однородной среде свет распространяется прямолинейно.
   b) Принцип независимого действия световых пучков: световые пучки действуют независимо друг от друга.
   c) Закон отражения: луч падающий, луч отраженный и нормаль к границе раздела двух сред, восстановленная в точке падения, лежат в одной плоскости. Угол падения при этом равен углу отражения.
   d) Закон преломления: луч падающий, луч преломленный и нормаль к границе раздела двух сред, восстановленная в точке падения, лежат в одной плоскости. При этом $(n\sin)_1=(n\sin)_2$
13. **Характерные лучи в случае тонких линз**
   a) Собирающая линза
      i) Сначала через оптический центр и дальше не преломляясь.
      ii) Сначала параллельно главной оптической оси, потом – через дальний фокус.
      iii) Сначала через ближний фокус, потом - параллельно главной оптической оси.
      iv) Сначала – через двойной ближний, потом – через двойной дальний.
   b) Рассеивающая линза
      i) Сначала через оптический центр и дальше не преломляясь.
      ii) Сначала параллельно главной оптической оси, потом – с воспоминаниями о ближнем.
      iii) Сначала с прицелом на дальний фокус, потом - параллельно главной оптической оси.
      iv) Сначала – с прицелом на двойной дальний, потом – с воспоминаниями о двойном ближнем.