

Термодинамика

Лектор — Князева Анна Георгиевна, профессор кафедры
физики высоких технологий в машиностроении

Лекции – 36 часов
Практические занятия – 18
Лабораторные – 18
Самостоятельная работа 54

Лекция № 1

*исторические сведения; предмет и метод; понятие о
термодинамической системе; переменные и параметры; теплота и
работа; задание термодинамической системы и ее состояния;
физические ограничения термодинамики*

Исторические сведения

Термодинамика – это не часть натурфилософии, а раздел физики, изучающий соотношения и превращения теплоты и других форм энергии.

θέρμη — «тепло» и δύναμις — «сила»

Появление термодинамики как науки связывают с изобретением парового двигателя, позволившего превратить теплоту в механическое движение. В отличие от Ньютоновской механики, возникшей из теории движения небесных тел, термодинамика имеет вполне земное происхождение.

В создании термодинамики приняло участие не одно, а несколько поколений ученых-физиков.

Если в XVIII в. в физике (за исключением механики) господствовал эксперимент, так что физику определяли как науку «о всем том, что через опыты познать можно», то в XIX в. картина начинает меняться.

В развитии термодинамики в XIX веке можно выявить три периода.

1. В общей обстановке эмпиризма лишь два исследования теоретического характера, выполненные в первой четверти столетия, стоят особняком: математическое исследование Жана Батиста Жозефа Фурье (1768–1830) и исследования военного инженера Сади Карно (1796–1832).

Ж.Фурье: «Аналитическая теория тепла» ;
С.Карно: «Размышления о движущей силе огня»

теплород

Предвидение Карно блестяще оправдалось. Двигатели внутреннего сгорания и паровые турбины получили широкое развитие, создали новые производства: авиационное и автомобильное. Новые двигатели второй половины XX в — ракеты — создали сверхскоростной воздушный транспорт и вывели человечество в космос. **Начиная с конкретной задачи, подсказанной практикой**, Карно формулирует абстрактный, общий метод ее решения — термодинамический метод. Сочинение Карно явилось началом термодинамики.

2. Второй период примерно продолжился до середины XIX века и связан с развитием термодинамики выдающимися физиками Европы. Среди них англичанин **Дж. Джоуль (1818-1889)**, опытным путем установивший, что теплота не сохраняется. Он ввел понятие о механическом эквиваленте теплоты; убедился, что теплота отнюдь не вещество, подобное воде. Однако природа теплоты для него была не ясна. Другой англичанин **У. Томсон**, или **лорд Кельвин** (1824-1907) высказал предположение о том, что в природе, по видимому, существуют два независимых фундаментальных вида движения.

Немецкий физик **Готтлиб**, известный под псевдонимом **Р. Клаузиус (1822-1888)** в монографии "О движущей силе теплоты" (1850) ввел понятие энтропии; предполагал, что в природе есть два основополагающих принципа движения, отказался от идеи теплорода, а природу теплоты объяснял поведением частиц вещества. Этих же идей в XVIII веке придерживался русский ученый **М.В. Ломоносов**.

Французский физик и инженер **Клапейрон (1799-1864)** внес существенный вклад в термодинамику. Заметим, что в 1820-1830 гг. Клапейрон работал в С-Петербурге в институте Путей Сообщения. В эти годы он придал математическую форму идеям Карно, ввел диаграммный метод исследования термодинамических процессов (PVT-диаграммы). В 1834 г. вывел уравнение состояния идеального газа, обобщенное впоследствии Д.И.Менделеевым (1870). Установил так называемые уравнения Клапейрона-Клаузиуса, которые связывают температуры кипения и плавления с давлением газов.

3.Третье поколение термодинамиков открывает австрийский физик, чл-корр. С-Петербургской Академии Наук **Людвиг Больцман (1844-1906)**. Он установил связь тепловой и механической формы движения, показав, что в основе теплоты лежит механическое движение атомов и молекул. Отметим, что в то время существование атомов еще не было общепризнанным. Больцман существенно развил кинетическую теорию газов и заложил основы статистической физики. К этому же поколению термодинамиков относятся **Гиббс и Гельмгольц**.

Американец **Гиббс (1839-1903)** разработал химическую термодинамику, т.е. сделал физическую химию дедуктивной наукой. Ввел понятие свободной энергии, показывающей, какое количество энергии можно получить в результате химической реакции. Ввел энтропийные диаграммы в техническую термодинамику.

Немецкий естествоиспытатель, член Берлинской Академии Наук и С - Петербургской Академии Наук **Герман Гельмгольц (1821-1894)** ввел в термодинамику понятие свободной и связанной энергии, придал закону сохранения энергии всеобщий характер.

На протяжении XIX века были сформулированы основные положения (начала) термодинамики изолированных систем. В первой половине XX века термодинамика развивалась в основном не вглубь, а вширь, возникали различные ее разделы: техническая, химическая, физическая, биологическая и т. д. термодинамики. Только в сороковых годах появились работы по термодинамике открытых систем вблизи точки равновесия, а в восьмидесятых годах возникла синергетика. Последнюю можно трактовать как термодинамику открытых систем вдали от точки равновесия

Основные направления развития в XX веке:

- 1.Термодинамические свойства паров, жидкостей и твердых тел. (Разными авторами были предложены более 100 уравнений состояния)
- 2.Фазовые равновесия и фазовые превращения
- 3.Термодинамика излучения
- 4.Термодинамика электрических и магнитных явлений
- 5.Химические реакции
- 6.Биологические процессы

Любое определение будет неполным!

«Термодинамика - наука о закономерностях взаимного преобразования различных видов энергии»

«Термодинамика есть раздел инженерной науки, которая имеет дело с движением (Dynamics) и/или превращением тепла (Thermo) и энергии в различные другие энергосодержащие формы»

Предмет и метод

Исторически сложившееся название «**термодинамика**» плохо отвечает содержанию предмета.

Термодинамика не изучает законы движения теплоты; явления теплопередачи и теплопроводности.

Понятие о времени в классическую термодинамику не вводилось. Сейчас используется только в ТПН и иных современных теориях.

1927 (Констамм) – «**термостатика**». Но речь в термодинамике идет не только о состоянии равновесия. Важно определить направление и энергетический эффект процессов.

В термодинамике есть разделы, где изучаются электрическая энергия, энергия химического взаимодействия и др. Но слово «**энергетика**» тоже неудачно. Важнейшие разделы посвящены изучению свойств веществ.

Понятие «**теплота**» для термодинамики также существенно как «**работа**», но предмета термодинамики также не определяют.

Если **в XIX веке** основной линией развития была **техническая термодинамика**, то в XX веке области исследования термодинамики существенно расширились.

Альберт Эйнштейн:

«Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее исходные предпосылки, чем разнообразнее те факты, между которыми она устанавливает взаимосвязь, и чем шире простирается область ее применимости. Именно поэтому классическая термодинамика произвела на меня сильное впечатление. Это единственная физическая теория универсального содержания, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных принципов она никогда не будет опровергнута»

Сох R.Т.:

«Классическая термодинамика удивительная наука, скромная и доставляющая утешение здравому смыслу. Величины, с которыми она имеет дело, попадают под масштаб обычных измерений. Законы, на которых она основана, подтверждаются обычными опытами. Как логическая система термодинамика изумительна по экономии средств. Ее понятия и принципы не содержат ничего лишнего. Пределы ее применимости четко сформулированы, и в этих пределах она является совершенной. В термодинамике ничего не пропущено и ничего не отложено в сторону»

Термодинамика в настоящее время это раздел, теоретической физики, имеющий достаточно определенное и четкое строение, связанное с именем И.Ньютона (I Newton, 1687), заложившим основы теоретической механики. По ньютоновскому образцу строились и другие разделы теоретической физики.

Идеальный вариант теории можно представить следующим образом:

- формируются аксиомы (или начала), исходные положения теории. При этом определяется условный язык и круг явлений;
- формируется математический аппарат теории;
- изучаются приложения этого аппарата для решения конкретных физических задач. Сопоставление результатов расчетов с экспериментом служит той обратной связью, которая подтверждает, а иногда и корректирует систему исходных аксиом теории и ее ограничений.

По этому образцу построена и термодинамика и все ее современные ответвления.

Классическая термодинамика есть *логическое развитие трех законов*, являющихся обобщением огромного человеческого опыта:

Первое начало термодинамики есть закон сохранения и превращения энергии.

Второе начало термодинамики характеризует направление протекания термодинамического процесса.

Третье начало термодинамики утверждает, что абсолютный нуль температуры недостижим.

Термодинамические системы

Термодинамическое описание происходящих в природе процессов обычно начинается с разделения мира на «систему», и «внешнюю» или «окружающую» среду, которая включает в себя весь остальной мир.

- Всякий материальный объект, всякое тело, состоящее из большого числа взаимодействующих друг с другом и внешними полями частиц, называется **макроскопической или термодинамической системой**.

$$N_0 = 6,022045 \dots \cdot 10^{23} \quad \text{число Авогадро}$$

Начиная с какого N, система начинает проявлять особенности статистической системы?

В век ЭВМ выяснено, что в системе из сотни упругих «частиц» за время, в течение которого в системе в целом полностью произойдет 100 столкновений (т.е. за время порядка среднего времени свободного пробега), практически полностью устанавливаются равновесное распределение по скоростям и равновесное распределение по координатам. Для систем из десятков частиц для этого, естественно, требуется большее время. Но все равно такая система уже проявляет многих свойства статистических систем.

При проведении формальных расчетов для $N \gg 1$ и обсуждении результатов величинами порядка $O(1/N)$ пренебрегают. Но с физической точки зрения величина N всегда конечна. Поэтому рассматриваемые в термодинамической теории статистические системы - системы конечных лабораторных размеров (макроскопические системы).

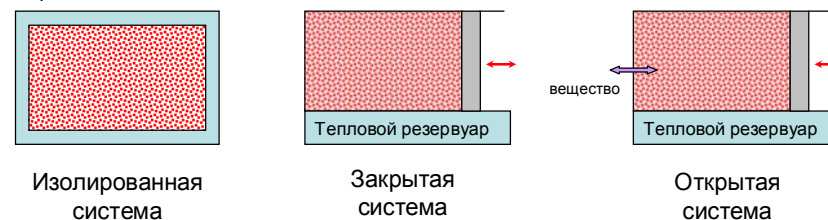
Классическая механика изучает закономерности простейшей формы движения материи – относительного перемещения тел в пространстве со временем. Термодинамика и статистическая физика имеют дело с явлениями, обусловленными совокупным движением огромного числа частиц, из которых состоят окружающие нас тела. Благодаря очень большому числу частиц их беспорядочное движение обладает особым качеством: макроскопические свойства систем из большого числа частиц в обычных условиях не зависят от начального положения этих частиц; определяющим фактором для возникновения теплового движения является не механическое движение отдельных частиц в системе, а существование коллектива большого числа частиц. Термодинамика и статистическая физика изучают тепловую форму движения материи. Т.е., предмет изучения этих наук один и тот же. Но методы, применяемые в этих разделах физики, различны, что приводит к их раздельному рассмотрению.

Предметом изучения классической термодинамики являются все факты физики и химии, которые представляют собой статистически закономерный результат молекулярных и атомных явлений. Область термодинамики ограничена в отношении размеров тел. Они должны быть достаточно велики, чтобы обеспечить выравнивание случайных событий микромира, т.е. термодинамика изучает тела конечных размеров.

Под словом **тело** подразумевается какое-либо вещество, взятое в определенном объеме и характеризующееся непосредственно или косвенно установленными физическими признаками, имеющими объективную меру. Все тела состоят из отдельных частиц, но их много в любом существенном для нас объеме, поэтому тело можно рассматривать как среду, заполняющую пространство сплошным образом. Классическая термодинамика рассматривает такие тела как целое. Время не входит в число понятий классической термодинамики.

Определение термодинамической системы часто зависит от существования «границ», отделяющих систему от остального мира. Чтобы понять термодинамическое поведение физических систем, важно учесть природу взаимодействия между системой и окружающей средой. По характеру взаимодействия с окружающей средой **системы делятся на три типа**:

Различают **изолированные системы**, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни массой; **закрытые** (или замкнутые) термодинамические системы, которые обмениваются с окружающей средой энергией, но не массой, и **открытые** термодинамические системы, обменивающиеся со средой и энергией, и массой.



В практических приложениях различают **гомогенные и гетерогенные системы**

•В термодинамике состояние системы принято описывать в терминах **макроскопических переменных состояния** (давление p , температура T , число химических компонентов N_k и др.)

Все признаки, характеризующие тело и имеющие объективную меру, называются **термодинамическими (макроскопическими) параметрами состояния тела**. Все макроскопические признаки, характеризующие такую систему и ее отношение к окружающим телам, называются **макроскопическими параметрами**. Макроскопические параметры это такие параметры, которые мы наблюдаем.

Параметры разделяются на **внешние и внутренние**; **интенсивные** (не зависящие от массы или числа частиц системе – давление, температура, плотность, удельный объем) и **экстенсивные** (пропорциональные массе или числу частиц, составляющих систему)

Если все признаки, характеризующие тело, во всех частях тела одинаковы, то мы говорим, что оно физически **однородно**.

Если тело представляет собой **смесь**, то мы говорим, что тело химически неоднородно.

Говорят, что химически неоднородное тело имеет **однородный состав**, если во всех его участках разные вещества, из смеси которых оно складывается, содержатся в одинаковых пропорциях. В противном случае состав тела неоднороден.

•Температура T , в отличие от давления, не имеет механических аналогов. Ее измеряют в градусах шкалы Кельвина. Используют также энергетические единицы. Тогда

$$\theta = kT$$

$$k = 1,380662 \dots \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град} - \text{постоянная Больцмана, } k = R_0/N_0$$

Иногда удобно выражать температуру в электронвольтах (эВ)

$$1 \text{ эВ} \approx 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \approx 1,16 \cdot 10^4 \text{ К.}$$

Понятие температуры вводится в термодинамике по существу феноменологически. Привычность понятия порождает в нас иллюзию, что по поводу определения не стоит мудрить. Надежды на статистическую механику не оправдываются хотя бы потому, что операция любого осреднения в статистической механике уже включает в себя понятие температуры. В статистическую механику понятие температуры вводится по наследству из макроскопической теории.

•Плотностью тела называют отношение его массы к объему

$$\rho = \frac{M}{V}$$

•Давлением называется сила, действующая на единичную площадь. В СИ единицей давления служит паскаль (Па):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$$

Давление, создаваемое столбом жидкости постоянной плотности ρ и высотой h

$$\rho g h$$

Давление земной атмосферы зависит от географических координат местности и времени, как правило, имеет порядок $\sim 10^5$ Па. Поэтому для измерения давления используется другая единица, называемая **баром**

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа.}$$

Атмосферное давление почти равно давлению столба ртути высотой 760 мм, с чем связаны следующие единицы измерения

1 торр = давление, создаваемое столбом ртути высотой 1 мм

$$1 \text{ атмосфера (атм)} = 760 \text{ торр}$$

$$1 \text{ атм} = 101,325 \text{ кПа}$$

•Для каждой термодинамической системы **существует состояние термодинамического равновесия**, которого она при фиксированных внешних условиях с течением времени самопроизвольно достигает. Этот тезис представляет собой так называемое **нулевое начало термодинамики**. Под состоянием термодинамического равновесия понимают такое состояние, когда макроскопические параметры системы (т.е. параметры, измеряемые с помощью макроскопических приборов) не изменяются с течением времени и когда в системе отсутствуют потоки любого типа.

В макроскопической теории нулевое начало – обобщение повседневного опыта и наблюдения за термодинамическими системами. Системы, не удовлетворяющие этому началу, можно исключить из термодинамических систем.

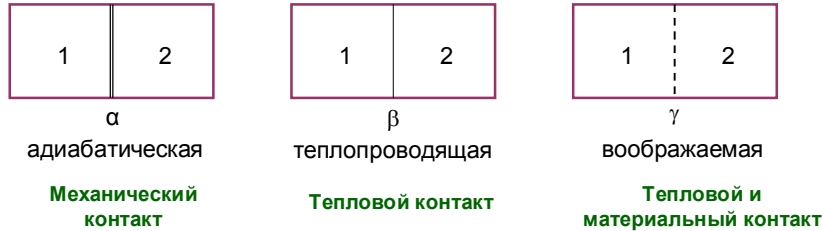
В отличие от равновесного состояния в механике, состояние термодинамического равновесия обладает особыми свойствами. Это – **подвижное состояние**, которое предполагает наличие беспорядочного теплового движения частиц. Состояние равновесия обладает своеобразным свойством термодинамической транзитивности, в соответствии с которым для любой равновесной системы существует связь параметров, характеризующих ее состояние, с температурой:

$$\varphi(Z_1, Z_2, \dots, T) = 0$$

Это соотношение или ему подобное называется уравнением состояния

Для описания состояния равновесия термодинамических систем используют специальный язык.

Термодинамические системы представляют собой лабораторные объекты и они имеют определенные размеры.



Свойство транзитивности **позволяет установить** общую для всех систем, находящихся в состоянии равновесия друг с другом, единую и не зависящую от места и способа измерения характеристику равновесного состояния – **температуру**. Количественное выражение температуры можно установить по величине какого-либо механического параметра системы 1, которую по каким-либо соображениям выбирают в качестве термометра.

Статистическая предельная процедура автоматически обеспечивает появление необходимой аддитивной структуры термодинамических величин

$$1. \quad \left. \begin{array}{l} N \rightarrow \infty, \\ V \rightarrow \infty \end{array} \right\} \text{ при условии } v = \frac{V}{N} = \text{const}$$

2. В качестве гарантированной удерживается только главная по N асимптотика, а именно

$$\lim_{v=\text{const}} F(\theta, V, N) \Big|_{N \rightarrow \infty} = Nf(\theta, v) \left(1 + O(N^{-1/3}) \right)^{as} = Nf(\theta, v) -$$

для величин аддитивного типа или

$$\lim_{v=\text{const}} \Phi(\theta, V, N) \Big|_{N \rightarrow \infty} = \varphi(\theta, v) \left(1 + O(N^{-1/3}) \right)^{as} = \varphi(\theta, v) -$$

для величин неаддитивного типа

Несогласованные между собой переходы не имеют физического смысла.

• По отношению к термодинамической системе имеет место термодинамический **принцип аддитивности**. Все величины, описывающие свойства термодинамических систем, можно отнести к одному из двух типов. Первые, называемые аддитивными, при суммировании их по всем частям системы дают свойство системы в целом. Вторые, неаддитивные, для каждой части системы имеют то же значение, что и для всей системы. К первым величинам принадлежат, например, число частиц, объем. Ко вторым – температура, давление и все удельные величины.

Если параметрами состояния являются температура и объем, то для аддитивной величины

$$F = F(\theta, V, N)$$

для неаддитивной величины $f = f(\theta, V)$

$$F(\theta, V, N) = Nf(\theta, V)$$

Возможность введения удельных величин, появляется лишь следствие того, что $N \gg 1$.

Итак, какими свойствами должна обладать изучаемая система, чтобы ее можно было назвать – термодинамической?

Во-первых, это – системы большого числа частиц.

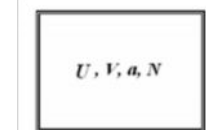
Во-вторых, для каждой термодинамической системы существует состояние термодинамического равновесия. Это и есть нулевое начало термодинамики.

В-третьих, по отношению к термодинамической системе имеет место термодинамический **принцип аддитивности**.

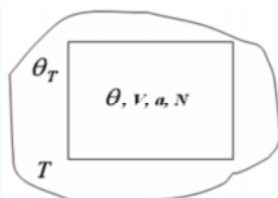
В-четвертых, по отношению к термодинамической системе справедливы I, II и III начала термодинамики. По традиции их считают основными аксиомами термодинамики. Принятие их приводит к формулировке макроскопического аппарата термодинамики.

Задание термодинамической системы и ее состояния

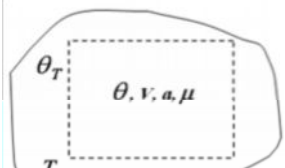
Выбор способа описания системы определяется тем, как мы выделяем объект из окружающей среды. Эта процедура, естественно, неоднозначна и зависит от конкретных задач.



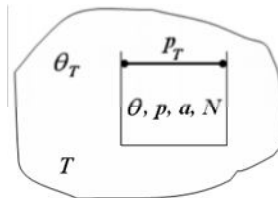
α Адиабатически изолированная система



β Система в термостате



γ Система, выделенная воображаемыми стенками



δ Система под поршнем

Энергия системы - энергия всех частиц, составляющих рассматриваемую систему. Объектом изучения в классической термодинамике является внутренняя энергия системы

$$N = \{N_i\}; \quad a = \{a_i\} \\ \mu = \{\mu_i\}$$

С точки зрения формального механического подхода варианты α – δ соответствуют выбору разных граничных условий и естественно было бы ожидать, что одна и та же система, помещаемая в сосуд с разными стенками, будет вести себя по-разному. Однако специфика термодинамического подхода к исследованию системы N тел состоит в том, что с **точки зрения коллективного поведения частиц**, все системы ведут себя одинаково!

Это позволяет ввести целый ряд важных характеристик системы.

$$U^{(1)as} = U(\theta, V, a, N) = Nu(\theta, V, a)$$

В термодинамике часто говорят о внешних и внутренних параметрах системы. Это разделение совершенно условно

Мы будем говорить, что **состояние** нашей **системы** задано, если заданы значения некоторых параметров, которыми полностью определяются все интересующие нас характеристики системы. Величины, не зависящие от предыстории системы и полностью определяемые ее состоянием в данный момент, называются **функциями состояния**. **Термодинамическими переменными** называются величины, количественно выражающие термодинамические свойства системы. Переменные, значения которых фиксированы при рассмотрении конкретной задачи, называются **термодинамическими параметрами**.

Теплота и работа

В макроскопической теории конкретизация термодинамической системы определяется характером ее взаимодействия с окружающей средой.

Реакции системы на внешнее воздействие разбивают на две группы.

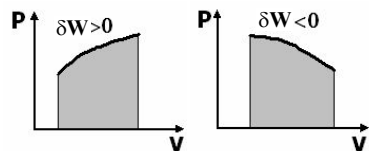
Первая – это реакция системы по отношению к изменению ее механических параметров, с которыми связывают понятие работы термодинамической системы.

$$\delta W = p dV \quad - \text{ работа расширения}$$

Работа термодинамической системы **в механическом понимании** – есть работа против внешних сил, поддерживающих определенные значения термодинамических параметров.

Если система находится в термостате, т.е. состояние фиксируется набором параметров (θ, Z, N)

то работа – это количество энергии, передаваемой системой окружающим ее телам при изменении ее макроскопических параметров



$$\delta W = B dZ = \sum_{(i)} B_i dZ_i$$

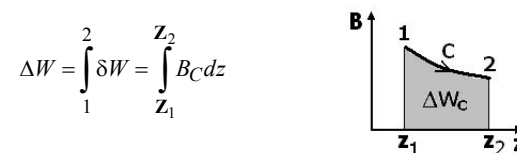
Конкретизация системы по ее реакции на изменение $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$

сводится к заданию величин $B_i = \delta W / \partial Z_i$ как параметров термодинамического состояния

$$B_i = B_i(Z_1, Z_2, \dots, Z_k, T, N)$$

Эти уравнения, связывающие обобщенные термодинамические силы с обобщенными термодинамическими параметрами и температурой, также называют уравнениями состояния термодинамической системы (*это есть термические уравнения состояния*).

Конечная работа при переходе системы из равновесного состояния 1 в равновесное состояние 2 есть сумма всех элементарных работ



Вторую величину - количественную меру теплового воздействия связывают с понятием **количества тепла** δQ

Это специфическое термодинамическое понятие возникло первоначально на основе многочисленных опытов по калориметрированию, во многих случаях достаточно хорошо описываемых уравнениями теплового баланса. Количественное определение может быть произведено следующим образом: если запретить системе совершать работу, то тепловое воздействие на систему измеряется изменением ее внутренней энергии. Обычно нагревание и охлаждение связывают с изменением температуры и понятием **теплоемкости**

$$\delta Q = C dT$$

Теплоемкость зависит не только от значений параметров состояния, но и от типа процесса. Естественнее всего зафиксировать величины Z и N .

$$C_{Z,N} = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_{Z,N} = C_{Z,N}(T, Z, N) = N c_{Z,N}(T, Z)$$

Это – так называемое калорическое уравнение состояния.

В классической термодинамике полагают, что термодинамическая система полностью задана, если заданы уравнения состояния. Этих уравнений достаточно для расчета с помощью аппарата макроскопической термодинамики всех остальных характеристик термодинамической системы.

Термодинамические процессы можно разделить на **равновесные** и **неравновесные**. Равновесным называется процесс, при котором все состояния, через которые проходит система, являются **равновесными состояниями**.

Термодинамический процесс, протекающий с нарушением термодинамического равновесия, называется неравновесным. Реальные процессы, протекающие в природе и в технике, являются неравновесными. Если отклонения от равновесия можно считать бесконечно малыми, процесс можно считать равновесным. В равновесном процессе система проходит ряд бесконечно близких состояний, каждое из которых является равновесным. Поэтому равновесные процессы называют также квазистатическими.

Тепловые процессы можно разделить на **обратимые** и **необратимые**. Обратимым называется процесс, который можно провести в противоположном направлении через все те же самые промежуточные состояния.

Более подробно со всеми этими понятиями мы далее познакомимся

Физические ограничения:

. Часть этих ограничений связана с выбором объекта исследования и способа его описания

а) выбор в качестве объекта исследования только термодинамической системы (т.е., системы, удовлетворяющей всем четырем сформулированным условиям).

б) отказ в макроскопической теории от описания флуктуационных процессов: параметры термодинамического состояния измеряются с помощью макроскопических приборов, т.е. соответствуют средним значениям.

Целый ряд ограничений связан с тем, что в классической термодинамике рассматриваются лишь **простейшие типы процессов** в термодинамических системах.

«**Процесс** это последовательная смена состояний чего-либо, стадий развития рассматриваемого явления, а также определённая совокупность последовательных действий, направленных на достижение некоторой цели» (происходит от латинского слова «*processus*» — течение, ход, продвижение).

Термодинамический процесс – это изменение макроскопического состояния термодинамической системы.

Содержание курса

1. Законы классической термодинамики
2. Теория потенциалов
3. Фазовые равновесия и фазовые переходы
4. Неоднородные и неравновесные системы. Термодинамические свойства
5. Элементы технической термодинамики
6. Введение в химическую термодинамику
7. Связь термодинамики и статистической физики
8. Классическая термодинамика необратимых процессов
9. Вдали от равновесия (Термодинамика Пригожина; иерархическая термодинамика; термодинамика Трусделла; термодинамика малых систем; неаддитивная термодинамика и др.)