

Лекция №5. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ. САМООРГАНИЗАЦИЯ

Термодинамика (от греч. *therme* — тепло + *dynamis* — сила) – раздел физики, изучающий соотношения и превращения теплоты и других форм энергии.

Все процессы, протекающие в природе, могут быть разделены на **равновесные и неравновесные**. Система находится в состоянии **равновесия**, если она не обменивается **энергией, массой, зарядом** с другими системами и при постоянных внешних условиях такое состояние не меняется со временем. Кроме этого и в самой системе не должны существовать перенос заряда, массы, энергии и тому подобное, то есть должны отсутствовать градиенты (перепады) температуры, концентрация и др. **Классическая термодинамика** рассматривает системы, близкие к равновесности.

Если в самой системе существует перенос заряда, массы, энергии и тому подобное, то есть существуют градиенты (перепады) температуры, концентрация и другое, состояние будет **неравновесным**. Пример таких неравновесных процессов – диффузия, теплопроводность, перенос электрического заряда. Изучением **неравновесных** (открытых, незамкнутых) систем занимается **неравновесная термодинамика**.

Окружающий нас мир: мир неживой природы, мир растений, мир животных – представляют собой системы, не находящиеся в состоянии термодинамического равновесия. Последнее по отношению к окружающему нас миру является некой абстракцией, слишком упрощенной моделью. Тем не менее в огромном большинстве практически важных случаев она приводит к правильным результатам.

Для **равновесных состояний** понятие *времени не существует* и оно в явном виде в термодинамику не входит. Однако термодинамика позволяет сделать выводы об общих закономерностях происходящих процессов и их направлениях. *Языком термодинамики являются функции состояния*, подобно тому, как основными понятиями классической механики являются координаты и импульсы частиц, а квантовая механика описывает процессы на языке волновых функций. *В основе классической термодинамики лежат четыре фундаментальных закона, которые в силу их общности и аксиоматичности называют “началами”*.

Нулевое начало. “Существует функция состояния – температура. Равенство температур во всех точках есть условие равновесия двух систем или двух частей одной и той же системы”. или “Для каждой изолированной термодинамической системы существует состояние термодинамического равновесия, которого она при фиксированных внешних условиях с течением времени самопроизвольно достигает.”

Понятие температуры определено только для состояния равновесия. Физический же смысл температуры наиболее отчетливо проявляется в молекулярно-кинетической теории. Здесь температура выступает как мера средней энергии теплового движения молекул. Для системы в состояниях,

сильно отличающихся от равновесных, понятие температуры вообще теряет смысл. Так, например, нельзя говорить о температуре газа во фронте сильной ударной волны или газа, подвергнутого воздействию мощного лазерного излучения.

Первое начало (закон сохранения энергии). Первое начало термодинамики было сформулировано в середине XIX века в результате работ немецкого учёного Ю. Р. Майера, английского физика Дж. П. Джоуля и немецкого физика Г. Гельмгольца. Существует несколько формулировок этого закона:

“Каждая термодинамическая система обладает характеристической функцией состояния – энергией. Эта функция состояния возрастает на величину сообщенного системе тепла Q и уменьшается на величину совершенной системой внешней работы A . Для изолированной системы справедлив закон сохранения энергии: $Q = \Delta U + A$, где U – внутренняя энергия (энергия хаотического движения всех микрочастиц системы и их взаимодействия). Количество теплоты подведенное к телу расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы.

или

“Полная энергия замкнутой системы не изменяется (вечный двигатель первого рода невозможен, т. е. невозможен переход всей подводимой к системе энергии в полезную работу) т.к. невозможен полный переход тепловой энергии в механическую и обратно.”

Вечный двигатель (лат. Perpetuum mobile) — воображаемое устройство, позволяющее получать полезную работу, большую, чем количество сообщённой ему энергии (КПД больше 100 %).

Вечный двигатель первого рода — воображаемое устройство, способное бесконечно совершать работу без затрат топлива или других энергетических ресурсов. Согласно закону сохранения энергии, все попытки создать такой двигатель обречены на провал. Невозможность вечного двигателя первого рода постулируется в термодинамике как первое начало термодинамики.

В настоящее время прародиной первых вечных двигателей по праву считается Индия (упоминание в стихах 1150 г).

На рис. показана одна из древнейших конструкций вечного двигателя. Она представляет зубчатое колесо, в углублениях которого прикреплены откидывающиеся на шарнирах грузы. Геометрия зубьев такова, что грузы в левой части колеса всегда оказываются ближе к оси, чем в правой. По замыслу автора, это, в согласии с законом рычага, должно было бы приводить колесо в постоянное вращение. При вращении грузы откидывались бы справа и сохраняли движущее усилие. Однако, если такое колесо изготовить, оно останется неподвижным. Причина этого факта заключается в том, что хотя справа грузы имеют более длинный рычаг, слева их больше по количеству. В результате моменты сил справа и слева оказываются равны.

На рис. показано устройство ещё одного двигателя. Автор решил использовать для выработки энергии закон Архимеда. Закон состоит в том, что тела, плотность которых меньше плотности воды, стремятся всплыть на поверхность. Поэтому автор расположил на цепи полые баки и правую половину поместил под воду. Он полагал, что вода будет их выталкивать на поверхность, а цепь с колёсами, таким образом, бесконечно вращаться.

Здесь не учтено следующее: выталкивающая сила — это разница между давлениями воды, действующими на нижнюю и верхнюю части погруженного в воду предмета. В конструкции, приведённой на рисунке, эта разница будет стремиться вытолкнуть те баки, которые находятся под водой в правой части рисунка. Но на самый нижний бак, который затыкает собой отверстие, будет действовать лишь сила давления на его правую поверхность. И она будет превышать суммарную силу, действующую на остальные баки.

В начале XIX в опыт конструирования тепловых машин показал, что КПД тепловых машин всегда меньше единицы (часть теплоты неизбежно рассеивается в окружающую среду). Для любой тепловой машины всегда

необходимы три элемента – нагреватель, рабочее тело, холодильник. Второй Закон Термодинамики обобщает этот факт.

В 1775 году Парижская академия наук приняла решение не рассматривать заявки на патентование вечного двигателя из-за очевидной невозможности их создания.

Второе начало (энтропия и энергия). В 1850г немецкий физик Р. Клаузиус сформулировал второе начало термодинамики: невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от более холодных тел к более нагретым. Независимо от Клаузиуса в 1851г У. Томсон (лорд Кельвин) дал второму началу формулировку: невозможно построить периодически действующую тепловую машину, вся деятельность которой сводилась бы к совершению механической работы и охлаждения тепла резервуара. В 1854г Клаузиус ввел понятие энтропии. “Каждая термодинамическая система обладает функцией состояния, называемой энтропией S . $\Delta S = \Delta Q/T$. Энтропия замкнутой системы при необратимых процессах возрастает (не может уменьшаться), (вечный двигатель второго рода невозможен).” $\Delta S \geq 0$.

Вечный двигатель второго рода — воображаемая машина, которая, будучи пущена в ход, превращала бы в работу всё тепло, извлекаемое из окружающих тел. Невозможность вечного двигателя второго рода постулируется в термодинамике в качестве одной из эквивалентных формулировок второго начала термодинамики.

Это фундаментальное уравнение объединяет первое и второе начала и в нем по существу заключена вся равновесная термодинамика. Наиболее глубоко смысл энтропии вскрывается при ее статистической интерпретации. В 1872г А. Больцман установил, что возрастание энтропии обусловлено переходом системы из менее вероятного состояния в более вероятное. Иными словами, эволюция замкнутой системы осуществляется в направлении наиболее вероятного перераспределения энергии по отдельным подсистемам. На основании этого возникла драматическая формулировка второго начала термодинамики, принадлежащая Клаузиусу: “Энтропия Вселенной возрастает”. Из этого утверждения следует, что Вселенная движется к “тепловой смерти”. Все виды энергии во Вселенной, в конце концов, перейдут в энергию теплового движения, равномерно распределенную по веществу. Все микроскопические процессы, определяющиеся переносом энергии, массы, заряда, прекратятся.

Действительно, при таком “сценарии” развития Солнце, звезды в какой-то момент израсходуют запасы свободной энергии, излучив их во всех направлениях. Ярко светящиеся звезды погаснут. Все существующие в природе перепады температуры выровняются, и все тела приобретут одинаковую среднюю температуру. При этом, в соответствии с законом сохранения энергии, полная энергия Вселенной сохранится. Но исчезнет вся жизнь, ни одна машина не сможет прийти в движение.

Столь мрачная картина “тепловой смерти” основана на предположении, что второе начало термодинамики применено без ограничений, абсолютно во всех областях физики, во всех точках пространства, во все моменты времени.

Какие возражения могли быть сформулированы против этой гипотезы?

1. Второе начало термодинамики (или Закон возрастания температуры) получено обобщением данных наблюдений и опытов, относящихся к ограниченным (пусть и очень большим) системам. Распространение же этого начала на всю Вселенную есть очень грубая экстраполяция (зная крайние значения можно построить график и по нему найти среднее значение какой-либо величины, значение которой в этом интервале не известно), для которой нет достаточных оснований.

2. Вселенная не является изолированной системой. По современным представлениям она не однородна, не стационарна.

3. За счет существующих взаимодействий, в первую очередь – гравитационных, роль в эволюции отдельных областей Вселенной играют флуктуации, случайности, никак не учтенные классической термодинамикой.

Гипотеза “тепловой смерти” не согласуется с наблюдениями над Вселенной в ее современном состоянии, а также с выводами, которые можно сделать из известного нам прошлого Вселенной. Наблюдается непрерывный рост разнообразия, эволюция в направлении возникновения более сложных форм. Основные причины формирования звезд, галактик, планет – флуктуации плотности и гравитационное взаимодействие.

Третье начало (тепловая теорема Нернста). “При абсолютном нуле температуры энтропия принимает значение S_0 , не зависящее от давления,

агрегатного состояния и других характеристик вещества. Эту величину можно принять равной нулю”. В отличие от нулевого, первого и второго начал теорема Нернста не вводит в термодинамику новой функции состояния, однако именно она делает функции состояния численно определенными и практически полезными.

Неравновесная термодинамика. Появление в системе потоков (тепла, массы и т. д.) нарушает статистическое равновесие. Однако, если процессы, возмущающие равновесие, менее интенсивны, чем процессы, которые формируют равновесие, то можно говорить с определенной степенью точности о локальном равновесии, то есть о равновесии в физически бесконечно малом объеме. Идея о локальном термодинамическом равновесии была впервые высказана Ильей Пригожиным и оказалась очень плодотворной в термодинамике необратимых процессов. Принцип локального равновесия является постулатом и его справедливость вытекает из совпадения результатов теории с экспериментальными данными.

Общим свойством неравновесных (открытых, незамкнутых) систем (т. е. систем, способных обмениваться веществом и энергией с внешней средой) является их **самоорганизация**. Установление этого факта является заслугой неравновесной термодинамики, причем именно неравновесность служит источником упорядоченности (порядка).

Самоорганизация – процесс взаимодействия элементов, в результате которого происходит возникновение нового порядка или структуры в системе.

Новая структура была названа **диссипативной от лат. *dissipatio* – рассеивание**, она более сложная, чем первоначальная. Такой переход сопровождается понижением порядка симметрии. **Диссипативные структуры** (термин предложен Ильей Пригожиным) – упорядоченные образования, возникающие в диссипативных системах в ходе неравновесных необратимых процессов, которые могут существовать только при диссипации (рассеивании) энергии от внешнего источника (новые структуры, требующие для своего становления большого количества энергии). За разработку теории диссипативных структур в 1977 г. И. Пригожину была присуждена Нобелевская премия по химии.

Диссипативные структуры “легализовали” существование жизни. По Пригожину: “Жизнь больше не выглядит как островок сопротивления второму началу термодинамики или как деятельность каких-то демонов Максвелла. Она возникает теперь как следствие общих законов физики с присущей ей специфической кинетикой химических реакций, протекающих в далеких от равновесия условиях. Благодаря этим специальным кинетическим законам потоки энергии и вещества создают флуктуационный и структурный порядок в открытых системах”.

Новая структура всегда является результатом неустойчивости и возникает из флуктуаций. В докритическом режиме они затухают, а в закритическом усиливаются и делают устойчивым новый режим, новую структуру, которая возникает вслед за неустойчивостью. Структура возникает после преодоления некоторого порогового значения в далеком от равновесия состоянии. Основные свойства самоорганизующихся систем: открытость, нелинейность, диссипативность.

В развитии системы можно выделить следующие *этапы*:

- система должна быть открытой (обязательный обмен энергией и (или) веществом с окружающей средой);
- неравновесность системы – достигается при определенных состояниях и при определенных значениях параметров, характеризующих систему, которые приводят систему в критическое состояние, сопровождаемое потерей устойчивости;
- возникновение флуктуаций (от лат. fluctuatio – колебание, случайные отклонения наблюдаемых физических величин от их средних значений);
- достижение точки бифуркации (рис) – критического значения параметров системы, при которых возникает неоднозначный переход в новое состояние.
- Скачок – переход системы в новое более упорядоченное состояние.

В качестве примеров формирования структур вдали от равновесных и периодических процессов рассмотрим следующее.

1. В гидродинамике. Переход ламинарного течения в турбулентное.

При термодинамическом равновесии вода находится в покое. Если нарушить равновесие, создав, например, градиент давления, то вода начнет перемещаться в сторону меньших давлений. До некоторой критической скорости течения будет ламинарным, т.е. вода будет перемещаться как бы слоями, параллельными направлению течения. При переходе через некоторое критическое значение скорости v_c картина движения жидкости удивительным образом преобразуется: поток станет турбулентным (рис. 1). Проблема перехода к турбулентности в гидродинамике одна из самых интригующих и трудных. Она решается вот уже более ста лет, однако сколь-нибудь надежного количественного описания возникновения турбулентности до сих пор нет. Одна из самых красивых картин возникновения турбулентности предложена академиком Л.Д. Ландау в 1944 г. Согласно его схеме, турбулентность есть результат последовательной потери устойчивости течений с менее сложной структурой и формированием течений с более сложной структурой.

2. В биологии. Ячейки Бенара – модель самоорганизации биосферы.

Если слой жидкости сильно нагреть, то возникает разность (градиент) температур ΔT между нижней и верхней поверхностями (рис. 1). Такой температурный градиент называется инверсным, т.к. жидкость у нижней поверхности вследствие теплового расширения имеет меньшую плотность, чем вблизи верхней поверхности. Из-за наличия силы тяжести (mg) и выталкивающей силы Архимеда ($\rho g V$) такая система оказывается неустойчивой, поскольку легкий нижний и тяжелый верхний слои стремятся поменяться местами. Однако вследствие вязкости (внутреннего трения) при небольших градиентах температуры движение не возникает и тепло передается только путем теплопроводности. Лишь при достижении некоторого критического значения температурного градиента появляется конвекционный поток, обладающий характерной структурой в виде шестиугольных ячеек, содержащих около 10^{21} атомов. Внутри ячеек

жидкость поднимается вверх. А по краям опускается вниз. Такую картину достаточно просто наблюдать при кипении воды в сосуде с толстым дном.

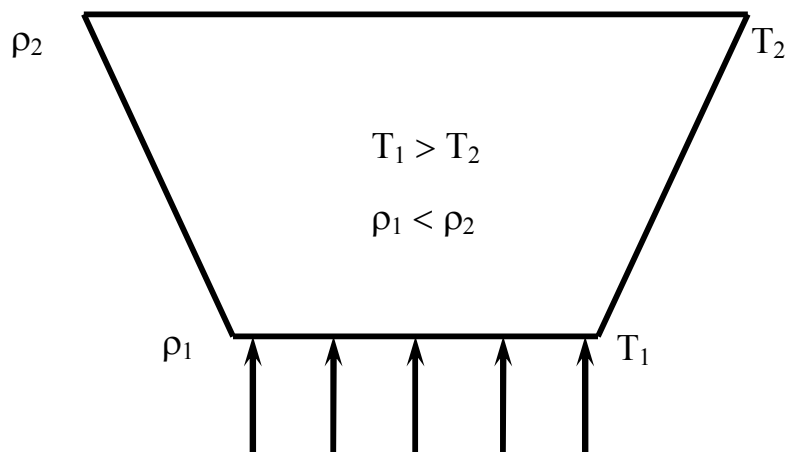


Рис. 1. Эффект Бенара

Ячейки Бенара по сравнению со слабонеоднородным распределением параметров в покоящейся жидкости являются более высоко организованной структурой, возникающей вследствие коллективного движения молекул в жидкости. Поскольку система обменивается со средой только теплом и в стационарных условиях получает (при температуре T_1) такое же количество тепла Q , что и отдает (при $T_2 < T_1$), то выходит, что система отдает энергию среде ($\Delta S = Q/T_1 - Q/T_2 < 0$). Другими словами, внутренняя структура или самоорганизация поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии.

Считается, что ячейки Бенара, если говорить упрощенно, как бы в миниатюре воспроизводят условия, необходимые для существования жизни на Земле. Земля-матушка получает высококачественную энергию от Солнца-батюшки, перерабатывает ее, что сопровождается ростом энтропии, и выбрасывает ее в космическое пространство вместе с наработанной энтропией. Среди прочего именно это обстоятельство обеспечивает жизнедеятельность на Земле.

3. В биологии. Модель Лотки-Вольтерра (хищник-жертва). Кроме рассмотренных выше пространственных структур возможны и временные. В качестве примеров временных структур часто используют различные вариации модели “хищник-жертва” (модель Лотки-Вольтерра). Популяции подобных пар типа волки – косули или рыси – зайцы по наиболее существенному фактору изменяются известным образом. Возрастание жертв (косуль, зайцев) приводит к интенсивному росту хищников (волков, рысей). На каком-то этапе хищников становится так много, что это приводит к естественной убыли жертв. Тогда недостаток в пище уменьшает численность хищников, а количество жертв опять идет “в гору”. В результате повторения биологических циклов по численности хищников и их жертв работает природный колебательный процесс, напоминающий, математический маятник или колебательный контур.

4. В химии: реакция Белоусова – Жаботинского. Происходит изменение цвета, и образование пространственных фигур до тех пор, пока не иссякнет запас начальных веществ – реагентов. В зависимости от концентрации раствора цвет меняется периодически от красного до голубого, и этот период четко сохраняется, поэтому такие реакции стали называть “химическими часами”.

Впечатляющими в плане примеров пространственных, временных и пространственно-временных структур являются некоторые химические реакции, особенно классической считается реакция Белоусова-Жаботинского. В ней исследуются окислительно-восстановительные реакции $Ce^{3+} - Ce^{4+}$, $Ce^{4+} - Ce^{3+}$ (церий) в растворе серной кислоты H_2SO_4 , малоновой кислоты $CH_2(COOH)_2$, сульфата церия $Ce_2(SO_4)_3$ и бромата калия $KBrO_3$. За ходом реакции можно следить по цвету: красный (избыток Ce^{3+}), синий (Ce^{4+}). Оказалось, что цвет раствора периодически (при конкретных концентрациях указанных веществ период составляет 4 минуты) изменяется от одного до другого. Изучение подобных реакций, как правило, преследует цель понять механизм биологических часов.

5. В физике: генерация в атомной системе. В кристалле твердотельного лазера имеются активные, возбужденные накачкой от внешнего источника атомы, которые работают как антенны и испускают цуг волн. При малой мощности накачки световые цуги испускаются независимо друг от друга, и лазер работает как обычная лампа, испускают некогерентный свет. Начиная с некоторого порогового значения все атомы, начинают работать согласованно, атомы испускают свет в одной фазе, испуская когерентное излучение. Переход лазера в режим генерации соответствует образованию ячеек Бенара.

6. В биологии: история образования все более сложных форм жизни.

Синергетика от греч “синергена” – содействие, сотрудничество, “вместедействие”

1) По определению ее создателя Германа Хакена – занимается изучением систем, состоящих из многих подсистем самой различной природы, таких как электроны, атомы, молекулы, клетки, нейтроны, механические элементы, фотоны, органы животных и даже люди... Слово “синергетика” и означает “совместное действие”, подчеркивая согласованность функционирования частей, отражающуюся в поведении системы как целого.

2) Область научных исследований, целью которых является выявление общих закономерностей в процессах образования, устойчивости и разрушения упорядоченных временных и пространственных структур в сложных неравновесных системах различной природы.

Следует подчеркнуть, что синергетика отнюдь не является одной из пограничных наук типа физической химии или математической биологии, возникающих на стыке двух наук. По замыслу своего создателя профессора Г. Хакена, синергетика – это междисциплинарное направление, которое призвано играть роль своего рода метанауки, подмечающей и изучающей общий характер тех закономерностей и зависимостей, которые частные науки считали “своими”.

Это наука о самоорганизации простых систем, о превращении хаоса в порядок. Сегодня картина мира выглядит так. Мир, в котором мы живем, состоит из разномасштабных открытых систем, развитие которых протекает по единому алгоритму. В основе этого алгоритма заложена присущая

материи способность к самоорганизации, проявляющаяся в критических точках системы. Самая крупная из известных человеку систем – это развивающаяся Вселенная. ***Проблема выяснения условий возникновения порядка из хаоса – задача номер один современной науки.***

Синергетика – молодое научное направление, представляющее междисциплинарную универсальную теорию самоорганизации процессов самой различной природы. Возникшая на стыке физики, химии, биологии, астрофизики и других естественных наук и вобравшая в себя общенаучные системные идеи, синергетическая модель самоорганизации является на сегодняшний день наиболее обобщающей и наиболее эвристически плодотворной объяснительной моделью, описывающей взаимопереходы порядка и хаоса в эволюции систем, в том числе и социальных.