

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ, ЭКОНОМИКИ И ФИНАНСОВ**  
*Кафедра экономико-математического моделирования*

Д.М. Мухаметгалеев  
С.Н. Савдур

**ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ. ХАОС И ПОРЯДОК.**  
**СИНЕРГЕТИКА**

Учебное пособие

Казань - 2016

**Мухаметгалеев Д.М., Савдур С.Н.**

**Элементы термодинамики. Хаос и порядок. Синергетика: Учебное пособие / Д.М. Мухаметгалеев, С.Н. Савдур. – Казань: Казан. университет, 2016. – 79 с.**

*Рецензенты:*

канд. хим. наук, доц. ИУЭиФ КФУ И.Л. Беилин  
доктор тех. наук, проф. ИУЭиФ КФУ Ю.И. Азимов

В учебном пособии раскрываются основные элементы термодинамики, дается определение основных категорий естествознания таких как, энергия, энтропия и работа. Оно представляет материал, необходимый для осмысления основных физических представлений о теплоте, хаосе и порядке. Пособие содержит историческую справку о становлении теории теплоты. В учебном пособии раскрываются основные положения синергетики – нового направления в познании человеком природы и общества, которая составляет основу современной научной парадигмы. Работа приставляет материал, необходимый для осмысления современной концепции развития всех систем, в том числе экономических. Учитывая возрастающую роль самостоятельной работы студентов, данное учебное пособие расширяет материал лекции, поможет подготовиться к экзамену и зачету по курсу «Концепции современного естествознания». Контрольные вопросы и тестовые задания предназначены для проверки качества усвоения материала.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 080100.62 «Экономика». Оно может быть использовано студентами дневной и заочной формы обучения.

Принято на заседании кафедры экономико-математического  
моделирования

Протокол № 8 от 21 апреля 2016 года

© Казанский университет, 2016  
© Мухаметгалеев Д.М., 2016  
© Савдур С.Н., 2016



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Глава 1. Термодинамика и ее элементы. Хаос и порядок.....	6
1.1. Термодинамика. Хаос и порядок.....	6
1.2. Начала термодинамики.....	9
1.3. Проявления асимметрии.....	13
1.4. Сущность асимметрии.....	17
1.5. Виды энергии и энтропии.....	18
1.6. Становление теории теплоты.....	20
1.7. Термодинамический и статистический методы.....	22
Контрольные вопросы.....	25
Глава 2. Самоорганизация в природе. Синергетика.....	27
2.1 Понятие самоорганизации.....	27
2.2. Свойства самоорганизующихся систем.....	30
2.3. Синергетика.....	32
2.4. Неравновесная термодинамика и. Пригожина. закономерности самоорганизации.....	37
2.5. Самоорганизация вселенной.....	43
2.6. Экономическая синергетика.....	53
Контрольные вопросы.....	56
Тест.....	62
Глава 3. Задачи.....	71
3.1. Общие сведения.....	71
3.2. Примеры решения задач.....	72
3.3. Задачи для самостоятельного решения.....	73
Выводы.....	76
Рекомендуемая литература.....	78

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Термодинамика — раздел физики, изучающий наиболее общие свойства макроскопических систем и способы передачи и превращения энергии в таких системах. В термодинамике изучаются состояния и процессы, для описания которых можно ввести понятие температуры. Процессы, происходящие в термодинамических системах, описываются макроскопическими величинами (температура, давление, концентрации компонентов), которые вводятся для описания систем, состоящих из большого числа частиц, и не применимы к отдельным молекулам и атомам, в отличие, например, от величин, вводимых в механике или электродинамике.

Законы термодинамики носят общий характер и не зависят от конкретных деталей строения вещества на атомарном уровне. Поэтому термодинамика успешно применяется в широком круге вопросов науки и техники, таких как энергетика, теплотехника, фазовые переходы, химические реакции, явления переноса и даже чёрные дыры. Термодинамика имеет важное значение для самых разных областей физики и химии, химической технологии, аэрокосмической техники, машиностроения, клеточной биологии, биомедицинской инженерии, материаловедения и находит своё применение даже в таких областях, как экономика.

Реальные процессы представляются в классической термодинамике в виде последовательного набора равновесных состояний с переходом одного к другому с бесконечно малой скоростью. Такие идеализированные равновесные процессы являются обратимыми. Реальные термодинамические процессы всегда протекают с конечной скоростью, они неравновесные и необратимые. Их рассмотрение в рамках классической термодинамики является приближенным и требует иногда существенных поправок. Необратимость и конечность скоростей реальных процессов и возникающие при этом диссипация энергии и производство энтропии — это основные характеристики, анализируемые методами неравновесной термодинамики. Немецкий физик Герман Хакен назвал новое направление исследований синергетикой

Человечество вступило в этап своего развития, который называют информационным обществом. Главная его характеристика — компьютерная революция. В этих условиях появление новых парадигм

вполне закономерно и наиболее интегральной из них становится синергетика.

Синергетика – новое направление в познании человеком природы, общества и самого себя, смысла своего существования. Новое качество в познании достигается за счет использования нелинейного мышления и синтеза достижений различных наук при конструировании образа мировоззрения. По определению Философского словаря, синергетика – это область научного знания, в которой посредством междисциплинарных исследований выявляются общие закономерности самоорганизации, становление устойчивых структур в открытых системах. Словарь по кибернетике задачу синергетики видит в выявлении общих закономерностей и единства методов описания и моделирования процессов эволюции и самоорганизации в физических, химических, биологических, социологических, вычислительных и других естественных системах. Утверждая принципы нелинейного мышления, синергетика идет на смену классическим философско-методологическим системам, не способным подняться выше идеологических установок, узости или односторонности подхода к процессу познания. По всем этим причинам синергетика не приемлет подходы, свойственные оккультным наукам, религиозно-теологическим системам. Она тем самым освобождает мысль человека, от каких бы то ни было шор и открывает неограниченные просторы проявления его разума и творчества.

Отсюда становится понятным, почему сегодня так важно, чтобы синергетика изучалась каждым образованным человеком и прежде всего теми, кто в силу своих профессиональных обязанностей ученого, руководителя, специалиста не может оставаться в стороне от современной революции в естествознании и обществознании, новых тенденций в научном познании.

# ГЛАВА 1

## ТЕРМОДИНАМИКА И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ. ХАОС И ПОРЯДОК

### 1.1. Термодинамика. Хаос и порядок

«Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее посылки, чем различнее явления, между которыми она устанавливает связь, чем обширнее область ее применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня термодинамика. Она – единственная физическая теория универсального содержания, относительно которой я убежден, что в пределах применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута» А. Эйнштейн.

В течение длительного времени считалось, что применение термодинамики ограничивается различными техническими устройствами. Однако успехи физики низких температур (сверхпроводимость, сверхтекучесть), открытие явлений магнитного резонанса и когерентного усиления излучения (лазеры и мазеры) послужили мощным стимулом к исследованиям по статистической термодинамике. Особый интерес вызывает понятие энтропии, введенное Р. Клаузиусом и развитое Л. Больцманом, которое играет универсальную роль. Энтропия определяет многие закономерности в поведении систем в направлении их эволюции. Энтропия является одним из фундаментальных понятий в одном ряду с энергией, универсальной мерой движения материи. Понятие энтропии оказалось связанным с количеством информации. Энтропия позволяет количественно оценить порядок (структуру) и беспорядок (хаос), а также их взаимосвязь и возможность перехода одного в другое. Идея о возможности превращения хаоса в порядок (упорядоченные диссипативные структуры) легла в основу синергетики, научного направления на стыке физики, химии, математики, биологии и социологии. Значение ее особенно велико, так как все материальное производство – это создание из природных материалов искусственных структур, т.е. борьба с самопроизвольным ростом энтропии.

Ни один из разделов физики не способствовал в такой мере возвышению человеческого духа, как термодинамика, особенно ее второе начало. Второе начало термодинамики приводит к следствиям, далеко выходящим за рамки классической термодинамики – с его помощью

можно понять природные процессы, которые определяют все многообразие явлений в окружающем нас мире.

Над всем, что совершается в беспредельном пространстве, в потоке преходящего времени властвует Энергия, как царица или богиня, сохраняясь количественно неизменной. Но где свет, там и тень, имя которой – Энтропия. Она, как злой демон, старается умалить или совсем уничтожить все то прекрасное, что создает светлый демон – Энергия. Все мы находимся под защитой Энергии, и все отданы в жертву скрытому яду Энтропии. Количество энергии в замкнутой системе постоянно, количество же энтропии растет, обесценивая энергию качественно. Всюду рассеяние, выравнивание, обесценивание. Энергия – это источник деятельных сил, мера движения всех форм материи. Энтропия же – мера рассеяния энергии и увеличения всех форм беспорядка.

Понятие «энергия» стало выделяться из многозначного понятия «сила», когда начали использовать паровые машины, в которых тепло от сжигаемого угля превращалось в механическую работу поршня, перемещаемого давлением пара. Незадолго до этого интенсивность движения тел оценивали «живой силой» =  $m * v^2$ . Одним из первых в 1807г. термин “энергия” применительно к живой силе стал использовать Т. Юнг. В 1829 г. француз Г. Кориолис уточнил выражение, поделив его пополам. Позже появились понятия кинетической и потенциальной энергии.

Научившись различать виды материи, формы ее движения и виды взаимодействий, естествоиспытатели стали стихийно использовать понятия «механическая энергия», «электрическая энергия», «химическая энергия» и др., которые и в наше время не имеют точного определения.

В 1845-1847 гг. получил тщательное обоснование закон сохранения количества энергии при взаимопревращениях ее видов в изолированных системах – всеобщий закон природы – первое начало термодинамики. Учитывая выдающуюся роль энергии в жизни и прогрессе, ученые присвоили ей романтический титул «царица мира». Первое строгое определение энергии дал в 1853 г. английский ученый В. Томсон (лорд Кельвин): энергия материальной системы в определенном состоянии есть измеренная в единицах механической работы сумма всех действий, которые производятся вне системы, когда она любым способом переходит из этого состояния в произвольно выбранное нулевое состояние. Более

широкое определение дал Ф. Энгельс: энергия – это общая скалярная мера различных форм движения материи.

Заметив, что все виды энергии превращаются в тепло и рассеиваются в окружающей среде, всего через 20 лет ученые обнаружили и ее знаменитую тень – энтропию – меру рассеяния энергии. Чем больше рассеивается, деградирует энергия, тем больше растет величина энтропии.

Изменение энергии изолированной системы  $\Delta E = E_1 - E_2$  выражает максимальное количество работы  $W_{max}$ , которую система теоретически могла бы совершить, переходя из состояния 1 в состояние 2, а изменение энтропии  $\Delta S = S_1 - S_2$  – ту часть  $Q_0 = T_0 \Delta S$  запаса энергии  $\Delta E$ , которая в реальных условиях перехода при температуре  $T_0$  окружающей среды превращается в тепло, рассеивается, уменьшая величину действительной работы до  $W_0 = W_{max} - T_0 \Delta S$ . Опыт свидетельствует, что все процессы в реальных условиях сопровождаются трением и теплообменом, поэтому энтропия систем всегда возрастает при условии их полной изоляции. В противном случае энтропия может возрастать и убывать под действием внешних сил. Таким образом, Р. Клаузиус, В. Томсон и др. исследователи сформулировали закон возрастания энтропии (второе начало термодинамики): какие бы изменения ни происходили в реальных изолированных системах, они всегда ведут к увеличению энтропии. Распространение этого закона на всю Вселенную привело к ошибочной теории «тепловой смерти Вселенной», что противоречит принципу вечности движения во Вселенной, выражающемуся в законе сохранения и превращения энергии. Ограниченность действия закона возрастания энтропии и его статистический характер были доказаны Л. Больцманом в 1872гг. Теплота есть энергия беспорядочного хаотического движения вещества. Этот закон справедлив лишь для статистических систем, состоящих из большого числа хаотически движущихся объектов, поведение которых подчиняется законам теории вероятностей и определяется изменением параметров состояния (для газов – давление, температура, удельный объем). Возрастание энтропии таких систем указывает лишь наиболее вероятное направление протекания процессов и предполагается возможность маловероятных событий, называемых флуктуациями, когда энтропия уменьшается. Этот вывод Больцман сделал на основе прямой связи, которую он установил между энтропией и термодинамической вероятностью состояния ( $S = k \log W$ ).



Немецкий физик М. Планк привел открытую Больцманом зависимость к виду  $S = k \ln A$ , где  $A$  – термодинамическая вероятность,  $k$  – постоянная Больцмана ( $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К). Так как беспорядок всегда вероятнее, чем относительный порядок, то можно записать иначе  $S = k \ln D$ , где  $D$  – количественная мера беспорядка или неупорядоченности. Разбилась тарелка, стерлись покрышки, сгорели дрова – энтропия увеличилась и становится максимальной при наступлении полного беспорядка, т.е. при отсутствии каких-либо закономерностей.

С понижением температуры упорядоченность макросистем растет – газ превращается в более упорядоченную систему частиц – жидкость, а она в еще более упорядоченную – твердое тело. Соответственно уменьшается величина энтропии. Это позволило немецкому физико-химику В. Нернсту предположить, что с приближением к абсолютной температуры к нулю энтропия тоже стремится к нулю – «тепловая теорема Нернста» или третий закон термодинамики. Эти три закона вместе с молекулярно-кинетической теорией составили основу термодинамики, сформировавшейся в конце XIX в. Как теория теплового двигателя.

Особенность тепловой энергии состоит в том, что она является энергией неупорядоченного, хаотического движения мельчайших частиц тела, в то время как все другие виды энергии – результат упорядоченного движения. Порядок всегда проще превратить в хаос, упорядочить же хаос гораздо труднее.

## 1.2. Начала термодинамики

Само название «термодинамика» указывает на происхождение этой науки, занимавшейся первоначально изучением теплоты; в дальнейшем она включила в себя изучение превращений энергии во всех ее формах. Термодинамика основана на небольшом числе утверждений, которые в сжатой форме включают в себя огромный опыт человечества по изучению свойств энергии в процессах ее превращений. Эти утверждения носят название законов (или начал) термодинамики.

Всего насчитывается четыре закона, или начала, термодинамики. Первым по времени было установлено второе начало, последним – нулевое начало; в промежутке между ними были установлены первое и третье начала термодинамики (последнее по своему статусу не вполне соответствует остальным началам). К счастью, однако, содержание этих

законов проще, чем их хронология, отражающая трудности установления свойств столь эфемерного объекта, каковым является энергия.

Нулевое начало термодинамики, сформулированное всего около 50 лет назад, по существу представляет собой полученное «задним числом» логическое оправдание для введения понятия температуры физических тел. Температура – одно из самых глубоких понятий термодинамики, и важно лучше разобраться в своеобразных свойствах температуры. Температура играет столь же важную роль в термодинамике, как, например, время в разделе физики, называемом просто динамикой. Интересно отметить, что между этими величинами действительно есть аналогии, причем несколько более глубокие, чем просто совпадение обозначений с помощью одной и той же буквы  $t$ . Пока достаточно считать, что температура – это просто уточнение и количественное выражение понятия «степени нагретости».

Первое начало термодинамики обычно формулируется так: «Энергия сохраняется». Тот факт, что сохраняется именно энергия, а не теплота, стал основополагающим открытием 50-х годов прошлого столетия, которым мы обязаны Кельвину и Клаузиусу. Вообще говоря, основным достижением науки 19 в. явилось признание энергии как наиболее общего понятия, позволяющего рассматривать с единой точки зрения все явления и процессы. Впервые центральное место в физике заняло совершенно абстрактное понятие; оно пришло на смену введенному еще во времена Ньютона (17 в.) понятию «силы» - на первый взгляд более конкретному и «осязаемому» и к тому же успешно «математизированному» Ньютоном.

Сегодня понятие энергии настолько прочно вошло в нашу жизнь, что очень трудно представить себе истинный масштаб интеллектуального достижения, которое заключалось в формулировке этого понятия; не менее трудно и дать ему точное определение (впрочем, с подобными трудностями мы сталкиваемся также при попытках придать точный смысл другим широко используемым фундаментальным понятиям, таким, как заряд, спин и т.д.). Не вдаваясь в детали, будем пока считать, что понятие энергии интуитивно ясно и адекватно отражается в своем определении: энергия – это способность совершать работу. Момент, когда понятие энергии выдвинулось на центральное место в физике, можно установить достаточно точно. Еще в 1846 г. Кельвин утверждал, что физика основана на понятии силы; однако после встречи и беседы с Джоулем в 1847 г. от (к 1851 г.) в конце концов, принял новую точку зрения. Энергия предстала

отныне как более фундаментальная величина, которая всегда присутствует во всех явлениях, тогда как силы могут появляться и исчезать. Понятие энергии отвечало и религиозным воззрениям Кельвина: отсчитал, что творец в момент создания мира наделил его запасом энергии, и этот божественный дар будет существовать вечно, тогда как эфемерные силы подвержены многим превращениям, и с их помощью в мире ткется ткань преходящих явлений.

Кельвин надеялся, что ему удастся поднять авторитет понятия «энергия», которое в руках большинства физиков середины прошлого века было не более чем удобным формальным инструментом при анализе возможных изменений в системе частиц, лишенных притока энергии извне. Он также надеялся создать новую физику, целиком основанную на понятии энергии и свободную от ограничений, присущих тем или иным моделям. Кельвин считал, что все явления можно объяснить с помощью представлений о преобразовании энергии, а сами атомы и другие объекты следует рассматривать исключительно как проявление наличия энергии.

Современная физика, очевидно. До некоторой степени подтверждает взгляды Кельвина, однако при этом она не отрицает и существования самих атомов как носителей энергии.

Первое начало термодинамики – это закон сохранения энергии, написанный в виде, удобном для определения механической работы, полученной из тепла. Теплоту можно преобразовать в работу.

Количество теплоты  $\Delta Q$ , сообщенное телу, идет на увеличение его внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение работы  $\Delta A$ , т.е.

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A$$

Всякая термодинамическая система в любом состоянии обладает внутренней энергией – энергией теплового движения молекул и потенциальной энергией их взаимодействия. Возможны два способа изменения внутренней энергии термодинамической системы при ее взаимодействии с внешними телами: путем совершения работы и путем теплообмена. Из I-го начала термодинамики следует важный вывод: невозможен вечный двигатель первого рода, т.е. двигатель, который совершал бы работу из «ничего», без внешнего источника энергии.

Второе начало термодинамики устанавливает наличие в природе фундаментальной асимметрии, т.е. однонаправленности всех происходящих в ней самопроизвольных процессов. Достаточно заметить, что об этой асимметрии свидетельствует все окружающее нас: горячие

тела с течением времени охлаждаются. Однако холодные сами по себе отнюдь не становятся горячими; прыгающий мяч, в конце концов, останавливается, однако покоящийся мяч самопроизвольно не начинает подскакивать. Здесь проявляется то свойство природы, которое Кельвин и Клаузиус смогли отделить от свойства сохранения энергии. Это свойство состоит в том, что хотя полное количество энергии должно сохраняться в любом процессе (так эти ученые модифицировали первоначальную формулировку Карно о сохранении теплорода), распределение имеющейся энергии изменяется необратимым образом. Второе начало термодинамики указывает естественное направление, в котором происходит изменение распределения энергии, причем это направление совершенно не зависит от ее общего количества. Невозможен переход теплоты от тела менее нагретого к телу более нагретому, без каких-либо других изменений в системе или окружающей среде. Теплоту можно преобразовать в работу полностью лишь при абсолютном нуле температур. Невозможно совершить работу за счет энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии. Двигатель, работающий только за счет энергии находящихся в тепловом равновесии тел, был бы на практике вечным двигателем. II-ое начало исключает возможность создания такого вечного двигателя второго рода.

Третье начало термодинамики касается свойств веществ при очень низких температурах. Оно утверждает невозможность охлаждения вещества до температуры абсолютного нуля посредством конечного числа шагов. Следовательно, абсолютный нуль недостижим. Как говорилось ранее, третье начало вполне можно считать одним из «настоящих» законов термодинамики, поскольку оно очевидным образом предполагает атомное строение вещества, тогда как другие законы представляют собой лишь обобщение непосредственного опыта и не зависят ни от каких предположений подобного рода. Таким образом, между третьим началом термодинамики и остальными ее законами обнаруживается существенное различие, причем даже логическое обоснование третьего начала выглядит не столь надежным, как остальных законов.

Итак, пока мы лишь в самых общих чертах описали законы термодинамики, которые станут «вехами», отмечающими границы нашего поля исследования. Однако уже при беглом знакомстве нам придется столкнуться с определенной трудностью: термодинамика оказывается дисциплиной, очень тесно связанной с математикой. Клаузиус весьма

элегантно облек термодинамику в функциональную форму, содержащую набор математических соотношений между результатами наблюдений; однако если опустить их, то окажется, что нет и предмета для обсуждения.

Больцман придал термодинамике не менее красивую статистическую форму (ее основное соотношение выгравировано на его надгробии). Однако и в этом случае ее содержание в большой мере также сводится к уравнениям, без которых по существу нет предмета для анализа. Именно этот внутренне присущий термодинамике математический характер часто отпугивает от нее.

Тем не менее, предмет термодинамики настолько важен, а следствия второго начала столь фундаментальны и всеобъемлющи, что усилия пробить брешь в ее математических «крепостях» кажутся вполне оправданными. Это избавит нас от математических «страданий», которые для многих составляют чуть ли не основное удовольствие при знакомстве с этим предметом. Но и при таком, казалось бы, лишь внешнем описании термодинамики нам все же удастся осмыслить ее основные выводы относительно закономерностей, управляющих процессами в физическом мире.

Но в самом ли деле мы коснемся термодинамики только извне, оставаясь своего рода «туристами», так и не постигнувшими глубинных процессов? Правомерен и более оптимистический взгляд (применимый, впрочем, и к другим областям науки): математика существенна лишь для уточнения аргументов, для более тонкого процесса понимания, но отнюдь не является конечной стадией объяснения.

Достоинством и недостатком термодинамического метода, одновременно, является независимость от принятого взгляда на строение вещества. С помощью термодинамики можно решать многие важные задачи, вовсе не касаясь вопросов строения вещества.

### **1.3. Проявления асимметрии**

Внутренняя асимметрия (т.е. однонаправленность процессов), присущая природе, находит свое отражение в истории технического развития человеческой цивилизации. На протяжении тысячелетий превращение запасенной энергии или работы в теплоту было самым обычным делом. Однако широкое овладение обратным процессом – управляемым преобразованием теплоты или запасенной энергии в работу

– по настоящему началось лишь с наступлением промышленной революции. Мы говорим здесь «по-настоящему», поскольку работу люди, безусловно, научились получать много веков назад. Одним из примеров может служить преобразование энергии ветра (по существу одного из видов запасенной солнечной энергии) в движение жерновов мельниц и кораблей. Другой, более косвенный пример, хотя и с тем же конечным результатом, - использование работы, совершаемой животными. Но лишь с началом промышленной революции неожиданное открытие способов использования энергии и преобразования теплоты в работу стало активно воплощаться в жизнь. Отныне при совершении работы человек обрел независимость от животных и избавился от «диктата» природы с ее односторонне направленными процессами.

Первобытные люди научились добывать теплоту по мере необходимости и с избытком путем сжигания различных видов топлива. Если не учитывать таких естественных источников энергии, как ветер и домашний скот, то человечеству понадобились тысячелетия, чтобы открыть значительно более сложные способы, посредством которых запасенную в топливе энергию можно превращать в работу (разумеется, мы не говорим о таких косвенных способах преобразования, как использование «топлива» в виде пищи рабам, лошадям или тягловому скоту). Совершив промышленную революцию, люди обрели возможность получать работу в любом требуемом количестве (а иногда и в избытке).

Чтобы сравнить сложность различных способов получения теплоты или работы с использованием одного и того же вида топлива, достаточно посмотреть на оборудование, применяемое в каждом из процессов. Единственное, что требуется для получения теплоты из топлива, - это открытый очаг, в котором происходит свободное сгорание топлива: дерева, угля, животных или растительных остатков; в результате в большей или меньшей степени возникает избыточная теплота. Для получения работы необходимо значительно более сложное устройство. С помощью теплоты, получаемой в примитивных очагах, первобытные люди извлекали из недр Земли химические элементы – так закладывались основы построения материальной базы цивилизации.

Разумеется, первобытные люди не ведали. Что в зажженных ими кострах высвобождается энергия, ранее отобранная у Солнца. (Заметим, что многие древние народы поклонялись Солнцу, хотя это, безусловно, чисто случайное совпадение). На первых порах запросы человеческой

цивилизации были достаточно скромны, так что их вполне можно было удовлетворить за счет энергии солнечного излучения, запасенной деревьями в процессе их роста. Однако с развитием цивилизации потребности в энергии росли, «законсервированная» солнечная энергия использовалась все более интенсивно, и в качестве основного вида топлива на смену дереву пришел уголь. Но это еще не была техническая революция, поскольку происходящие изменения носили не качественный, а количественный характер: люди вынуждены были углубляться все дальше в прошлое, используя солнечную энергию, накопленную в более отдаленные времена.

Это углубление в прошлое по существу продолжается и в наше время: мы стремимся «пожать» посеянный тогда урожай. Мы широко используем, например, огромные запасы нефти – эти частично распавшиеся останки былой подводной жизни (которая, кстати, также существовала за счет Солнца). Однако наша потребности неуклонно растут, и мы углубляемся еще дальше в прошлое, пытаюсь собрать «дань» не только с Солнца, но и с других звезд. Так, атомы урана, которые мы сжигаем в современных «очагах» - ядерных реакторах, это не более, чем «пепел» давно сгоревших звезд. Эти атомы образовались в период агонии ранних поколений звезд, когда легкие атомы, энергично соударяясь друг с другом, сливались во все более тяжелые. Старые звезды взрывались, высвобождая атомы, которые распространялись затем по всему космическому пространству, попадали в очередное «пекло», вновь участвовали во взрывах и рассеивались, пока наконец не собрались в недрах горы, из которой мы решили их добыть.

Однако в поисках энергии, завещанной нам прошлым, мы заходим все дальше. Мы пытаемся «копаться» сейчас в эпохах, предшествующих не только рождению Земли, но и даже смерти первых поколений звезд – мы роемся в пепле ранней Вселенной!

В первые мгновения рождения Вселенной Большой взрыв потряс до основания пространство-время, и в расширяющемся космосе царил невообразимый беспорядок и хаос; однако в этом величайшем катаклизме возникли лишь простейшие из атомов. Образно говоря, космическая «гора» родила космическую «мышь»: когда хаос миновал, налицо оказался один водород, лишь чуточку «приправленный» гелием. Эти элементы (и по сию пору имеющиеся в избытке по сравнению с другими элементами) и есть «пепел и зола» Большого взрыва. Наши попытки

получить управляемую термоядерную реакцию (синтез атомов водорода в атомы гелия) направлены по существу на то, чтобы овладеть энергией, которой обладают эти атомы. Водород – старейшее из ископаемых видов горючего, и когда мы овладеем реакцией термоядерного синтеза, это будет означать, что мы докопались до самого «начала времен».

Итак, возникновение и развитие цивилизации характеризуются тем, что мы разрабатываем удобные и компактные источники энергии, сформировавшиеся во все более далеком прошлом. Однако при этом мы фактически реализуем всего-навсего одно примитивное открытие, а именно возможность высвобождения запасенной энергии в форме теплоты. Поэтому сколь бы ни были сложными новые «очаги», сгорание топлива любого происхождения – органического, звездного или даже рожденного в Большом взрыве – это не более чем поэтапное совершенствование древнего открытия. Подобные совершенствования сами по себе не являются революциями – это лишь качественно более эффективное использование старых как мир процессов.

Истинная революция в технике свершилась тогда, когда человек сумел освоить другой аспект асимметрии природы: преобразование теплоты в работу. Не случись этого, мы, возможно, были бы всегда согреты, но не стали бы мудрее. Этот аспект асимметрии природных процессов позволяет не просто овладеть энергией, запасенной в топливе, но и извлечь из нее движущуюся силу, которая в свою очередь помогает нам воздвигнуть искусственные сооружения, создавать транспортные средства и даже поддерживать связь на расстоянии. Почему же понадобилось столько времени, чтобы не только обнаружить, но и использовать эту асимметрию?

Перед человечеством стояла задача выделить упорядоченное движение и неупорядоченного, поскольку именно в характере движения состоит отличие работы от теплоты. Теперь нам предстоит глубже проникнуть в природу асимметрии, для чего нужно перейти из эпохи, предшествующей деятельности Карно, в эпоху, когда благодаря усилиям Клаузиуса и Кельвина возникло новое, современное понимание данной проблемы.



## 1.4. Сущность асимметрии

Для установления сущности асимметрии природных явлений воспользуемся паровой машиной, как делал Н. Карно, Р. Клаузиус и Л. Больцман. Паровая машина или тепловой двигатель – это устройства преобразующее теплоту в работу неопределенно долгое время в циклическом режиме. Цикл Карно – это лишь один из возможных способов получения работы с помощью теплоты. В каждом двигателе, как и в цикле Карно, должен быть свой холодильник, причем на определенной стадии цикла этому холодильнику необходимо отдавать часть энергии. В этом экспериментальном наблюдении по существу и состоит второе начало, что означает невозможность полного преобразования теплоты в работу в двигателе из-за потерь в холодильник. Подчеркнем существенную асимметрию: природа не облагает «налогом» преобразование работы в теплоту; например, за счет трения мы можем полностью разбазарить полученную работу. Однако с теплотой так поступить мы уже не сможем: в отличие от работы она облагается «налогом».

Итак, начинает выявляться определенная закономерность: прыгающие мячи рано или поздно останавливаются; горячие объекты остывают; нами установлена асимметрия между теплотой и работой. Область применимости второго начала термодинамики выходит теперь далеко за пределы паровой машины. Этот закон должен отныне во всеуслышание заявить о себе.

Наиболее важным итогом развития термодинамики в прошлом столетии явилось раскрытие природы теплоты и работы. Первоначально в XIX в. теплота рассматривалась как некий предмет, невесомый флюид, называемый теплотодом. Теперь известно, что никакого материального объекта, называемого теплотой, вообще не существует. То же справедливо и в отношении работы. Теплота и работа характеризуют способы передачи энергии. Сообщить какому-либо телу количество теплоты, т.е. *нагреть* его, означает передать ему энергию строго определенным способом. *Охладить* объект – это значит произвести действие, обратное нагреванию, т.е. отвести от него энергию, используя разность температур. Теплота – это отнюдь не одна из форм энергии, а название одного из способов передачи энергии. Работа – это то, что мы совершаем, когда нам

необходимо тем или иным способом изменить энергию объекта, не используя при этом разность температур, т.е. способ передачи энергии.

### 1.5. Виды энергии и энтропии

В настоящее время можно составить научно обоснованную классификацию видов энергии на основе учета вида материи, форм ее движения и взаимодействий:

Аннигиляционная энергия – полная энергия системы «вещество-антивещество», освобождающаяся в процессе их соединения и аннигиляции (взаимного уничтожения);

Ядерная энергия – энергия связи нейтронов и протонов в ядре, освобождающаяся в различных видах при делении тяжелых и синтезе легких ядер;

Химическая (атомная) энергия – энергия системы из двух или более реагирующих между собой веществ. Эта энергия высвобождается в результате перестройки электронных оболочек атомов и молекул при химических реакциях;

Гравитационная энергия – потенциальная энергия ультраслабого взаимодействия всех тел, пропорциональная их массам;

Электростатическая энергия – потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов, т.е. запас энергии электрически заряженного тела, накапливаемый в процессе преодоления им сил электрического поля;

Магнитостатическая энергия – потенциальная энергия взаимодействия «магнитных зарядов», или запас энергии, накапливаемый телом, способным преодолевать силы магнитного поля в процессе перемещения против направления действия этих сил;

Нейтрино статическая энергия – потенциальная энергия слабого взаимодействия «нейтринных зарядов» или запас энергии, накапливаемый в процессе преодоления сил  $\beta$ -поля – «нейтринного поля». Вследствие огромной проникающей способности нейтрино накапливать энергию таким способом невозможно;

Упругостная энергия – потенциальная энергия механически упруго измененного тела (сжатая пружина, газ), освобождающаяся при снятии нагрузки чаще всего в виде механической энергии;

Тепловая энергия – часть энергии теплового движения частиц тела, которая освобождается при наличии разности температур между данным телом и телами окружающей среды;

Механическая энергия – кинетическая энергия свободно движущихся тел и отдельных частиц;

Электродинамическая энергия – энергия электрического тока во всех его формах;

Электромагнитная (фотонная) энергия – энергия движения фотонов электромагнитного поля;

Мезонная энергия – энергия движения мезонов, квантов ядерного поля, путем обмена которыми взаимодействуют нуклоны;

Гравитонная энергия – энергия движения гравитонов;

Нейтринодинамическая энергия – энергия движения нейтрино;

Вакуумная энергия – энергия высвобождения материи при возбуждении вакуума, возникающего при высокой степени сжатия.

Из перечисленных 16 видов энергии практическое значение имеют пока только 10, при этом непосредственно используются всего 4 вида: тепловая (70-75%), механическая (20-22%), электрическая (3-5%) и фотонная (менее 1%).

Энтропия, как и подобает, тени, не передает всего многообразия красок и оттенков энергии. Существуют тепловая, структурная и информационная энтропия.

С тепловой энтропией мы уже познакомились. Структурная энтропия служит мерой неупорядоченности строения систем. Если из строительных деталей собрать дом, а из деталей автомобиля – автомобиль, то энтропия этих систем уменьшится, ибо упорядоченность их возрастет.

Рассмотрим информационную энтропию. При охлаждении газа до температуры абсолютного нуля он сначала переходит в жидкое состояние, а затем – в твердое, т.е. из менее упорядоченного состояния во все более упорядоченное. Соответственно растет и информация о расположении частиц газа, достигающая максимальной величины при абсолютном нуле, когда все они займут вполне определенное положение в твердом теле. Информация эквивалентна отрицательной энтропии, «негэнтропии». Информационная энтропия – это мера неопределенности сообщения.

## 1.6. Становление теории теплоты

Открытие законов механики, становление классической механики позволило разгадать большое количество загадок природы, но на многие вопросы теория не дала ответов: почему при деформации появляются силы упругости, почему вещество находится в 3-х агрегатных состояниях, на что тратится механическая энергия при трении, что такое теплота и т.д? Понятия «огонь», «свет», «теплород» встречались еще в Древней Греции. В 17 в. Пьер Гассенди теплоту и холод трактует как разные материи, причем атомы холода являются острыми, в отличие от атомов тепла, и проникая в жидкость они скрепляют ее, превращая в твердое тело.

Учение о тепловых явлениях начинает развиваться только в середине 18 века. Толчком для этого явилось изобретение термометра (Г.Галилей). Длительный период ученые не различали понятия тепло и температура. После Галилея изготовлением термометров занимались многие (Амонтон, Гук, Фаренгейт, Цельсий, Реомюр, Делиль, Гюйгенс и т.д.). Проблема совершенствования термометра явилась толчком для изучения теплового расширения тел. Однако все эти исследования не разделяли теплоту и температуру. Температура, теплота – есть мера сгущения теплорода.

«Теплород – вещественная причина жара, тепла и холода, непостижимо тонкая жидкость, изливающаяся из Солнца и проникающая во все тела физического мира, невидимая, невесомая и только ощущением ощущаемая».

Единица измерения теплоты – «калория» в переводе на русский язык означает «теплород». К счастью существовала и другая точка зрения, которая связывала сущность тепловых явлений с движением атомов, из которых состоят тела. Существовали: теплородная и кинетическая теория теплоты (корпускулярная теория).

Кинетической теории придерживались Френсис Бекон, Исаак Ньютон, Рене Декарт, Даниил Бернулли, Бойль, М.В. Ломоносов, Л. Эйлер. Однако господствующей в течение столетий являлась субстанциональная теория теплоты (теплородная). Смертельный удар был нанесен опытами Б. Румфорда. Также, как и теория флогистона была похоронена Антуаном Лавуазье, так и теория теплорода после опытов по сверлению пушки потерпела первое поражение. Согласно вещественной теории теплоты, чем больше теплорода в теле, тем выше температура

тела. В соответствии с корпускулярной теорией, чем быстрее движутся частицы тела, тем выше температура тела.

М.В. Ломоносов рассматривал теплоту, как вращательное движение частиц вещества. С помощью этой теории он объяснил процессы плавления, испарения и теплопроводности и пришел к выводу о существовании «наибольшей степени холода», когда движение частиц вещества прекращается. Благодаря М.В.Ломоносову в России было много сторонников кинетической теории теплоты. Однако в середине 18 в. победу одержала теория теплорода – после экспериментального подтверждения сохранения теплоты при теплообмене. Отсюда был сделан вывод о сохранении (неуничтожимости) тепловой жидкости – теплорода. В вещественной теории было введено понятие теплоемкости тел и построена количественная теория теплопроводности. Многие термины сохранились и сейчас. С помощью корпускулярной теории теплоты не удалось получить количественных соотношений, не удалось объяснить сохранение теплоты. Понятие энергии еще не было введено.

К концу 18 в. теплородная теория теплоты начала сталкиваться с трудностями и к середине 19 в. потерпела полное поражение так, как:

1. опыты показали, что тепловой жидкости нет;
2. при совершении работы паровыми машинами пар охлаждается и теплота исчезает;
3. источник тепла неисчерпаем, поэтому он не может быть материальной субстанцией (при трении можно получить любое количество тепловой энергии).

Теплород не существует, а теплота – есть движение.

В середине 19 в. была доказана связь между механической работой и количеством теплоты. Подобно работе (механической) количество теплоты оказалось мерой изменения энергии. Нагревание тела связано с увеличением его энергии. Принцип теплорода был заменен законом сохранения энергии. Установлено, что теплота – это особая форма энергии.

Немецкий естествоиспытатель врач Юлиус Роберт Майер (1814 - 1878) в 1842 г. сформулировал закон эквивалентности работы и теплоты, т.е. он первым сформулировал закон сохранения энергии. А в 1843-1850 гг. немецкий естествоиспытатель пивовар Джеймс Прескотт Джоуль (1818-1889) опытным путем установил механический эквивалент тепла, равный  $427 \text{ кГс м / ккал}$ .

В дальнейшем было установлено, что механическая и тепловая энергии – две формы энергии из большого числа ее форм (химическая, атомная, ядерная, электромагнитная и т.д.).

Значительный вклад в развитие теории тепловых явлений и свойств макросистем внесли немецкий физик Р. Клаузиус, английский физик Дж. Максвелл, австрийский физик Л. Больцман и др. в 18-19 вв. были установлены два, как тогда полагали, независимых друг от друга закона сохранения: закон сохранения массы и закон сохранения энергии, в соответствии с которыми масса и энергия изолированной системы неизменны. Это способствовало развитию двух методов исследования: термодинамического и статистического (молекулярно-кинетического).

### 1.7. Термодинамический и статистический методы

Имеется два подхода к изучению макроскопических явлений в макротелах: термодинамический и молекулярно-статистический.

Термодинамика или термодинамический подход – феноменологическое исследование явлений и свойств материальных тел, характеризуемых макроскопическими параметрами  $P$ ,  $T$ ,  $V$  и др. Основа подхода – начала, которые являются обобщением опыта. В этом подходе не выявляются микроскопические механизмы изучаемых явлений. Теплота рассматривается как какое-то внутреннее движение без конкретизации.

Термодинамика – это наука о тепловых явлениях, в которых не учитывается строение вещества. Все законы термодинамики относятся к телам, число молекул которых огромно – макроскопические тела (газ в баллонах, вода в стакане, песчинки, стержень и т.д.). Все тепловые процессы связаны с передачей и превращением энергии. Термодинамик базируется на фундаментальных законах – началах термодинамики.

Область применения термодинамики значительно шире, чем молекулярно-кинетической теории. Нет областей физики, химии, биологии и т.д., в которых нельзя было бы пользоваться термодинамическими методами. Однако ТД метод не дает информации о микроскопическом строении вещества, о механизме явлений, а лишь устанавливает связь между макроскопическими свойствами вещества.

Основа ТД метода – определение состояния ТД системы, представляющей собой совокупность макроскопических тел, которые

взаимодействуют и обмениваются энергией. Состояние системы задается ТД параметрами, характеризующими ее свойства: температура  $-T$ , давление  $-P$ , удельный объем  $-V$ .

Любое изменение в ТД системе называют ТД процессом. Макроскопическая система находится в ТД равновесии, если ее состояние со временем не меняется.

Одновременно с ТД методом развивалась корпускулярная теория теплоты, основанная на предположении, что вещество состоит из атомов, молекул, движения которых, подчиняются законам механики Ньютона. К концу 19в. была создана последовательная теория поведения больших общностей атомов и молекул – молекулярно-кинетическая теория (статистическая механика).

Статистический подход исходит из микроскопического описания. Для этого вводится представление об атомно-молекулярном строении вещества. В этом случае теплота рассматривается как проявление беспорядочного движения атомов и молекул. Законы поведения систем большого числа частиц выводятся из статистических закономерностей.

Процессы, изучаемые молекулярной физикой, являются результатом совокупного действия огромного числа молекул. Поведение большого числа молекул анализируется с помощью статистического метода (СМ). СМ основан на том, что свойства макроскопической системы определяются свойствами частиц системы, особенностями их движения и усредненными значениями кинетических и динамических характеристик этих частиц ( $V_i$ ,  $E_i$ ,  $P_i$  и т.д.). Нельзя говорить о температуре одной молекулы.

Молекулярная физика изучает движение больших совокупностей атомов и молекул. Молекулы и атомы находятся в непрерывном движении, которое впервые обнаружил в 1827 г. ботаник Р.Броун. Природа броуновского движения была понята в 1905-1906 годах (А.Эйнштейн и М.Смолуховский – молекулярно-статистическая теория броуновского движения). Их теоретические предсказания были проверены Ж.Б.Перреном.: 1. Хаотическое движение молекул газа или колебательное движение молекул твердого тела (жидкости) – тепловое движение. 2. Энергия, связанная с этим движением – внутренняя энергия. Макроскопические характеристики тел имеют физический смысл лишь в случае большого числа молекул.

При расчете различных процессов с помощью ТД многие физические параметры необходимо определять экспериментально. Статистические же методы позволяют на основе данных о строении вещества определять эти параметры. Существуют теории газов (идеальный газ, реальный газ), но количественная теория твердого и особенно жидкого состояния вещества очень сложна. Поэтому иногда простые расчеты, основанные на законах ТД, оказываются незаменимыми.

В основе молекулярно-кинетических представлений о строении лежат 3 положения:

1. любое тело состоит из большого числа малых частиц;
2. молекулы находятся в хаотическом движении;
3. интенсивность движения молекул зависит от  $T$  вещества.

Тепловые процессы связаны со строением вещества и его внутренней структурой: жидкость, газ, твердое тело (аморфное и кристаллическое - парафин и металл) и плазма. Поэтому исследования тепловых явлений используются для определения строения вещества и наоборот.

Свойства и поведение макросистем (разреженные газы и ядра планет) определяются поведением, движением и взаимодействием друг с другом частиц, из которых они состоят.

Броуновское движение – хаотическое движение молекул. Количественное выражение молекулярно-кинетических представлений дается законами Бойля-Мариота, Гей-Люсака, Авогадро, Дальтона, Максвелла, уравнениями Клайперона-Менделеева, Ван-дер-Ваальса и др.

Оба подхода используют молекулярно-кинетическую теорию, но в разной степени.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории следует вывод: средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа прямо-пропорциональна его термодинамической температуре и зависит только от нее.

$$E = (3 / 2) k T.$$

Следовательно, термодинамическая температура является мерой кинетической энергии поступательного движения газа.

Энтропия определяет многие закономерности в поведении систем в направлении их эволюции.

Понятие энтропии оказалось связанным с количеством информации и с качеством энергии.



Энтропия позволяет количественно оценить порядок (структуру) и беспорядок (хаос), а также их взаимосвязь и возможность перехода одного в другое.

Понятие состояния физической системы является центральным элементом физической теории. В зависимости от того, как это состояние определяется теории, делятся на динамические и статистические.

К первым относятся классическая механика, равновесная термодинамика, классическая электродинамика (координата, импульс, поле, заряд, давление, температура).

Вторую группу представляют статистическая механика (молекулярно-кинетическая теория), квантовая механика (вероятности распределения, волновая функция).

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите замечательную особенность термодинамики.
2. Какова роль и значение энергии и энтропии?
3. Отметьте особенность тепловой энергии.
4. Какое значение имеет хаос и порядок в эволюции?
5. Назовите два способа изменения внутренней энергии макросистемы.
6. Сформулируйте первое начало термодинамики.
7. В чем заключается сущность невозможности создания вечного двигателя первого рода?
8. Что такое термодинамическое равновесие?
9. Покажите асимметрию теплоты.
10. В чем заключается сущность необратимости тепловых процессов?
11. Охарактеризуйте суть невозможности создания вечного двигателя второго рода.
12. Дайте количественную формулировку второго начала термодинамики.
13. В каком случае достигается максимально возможное значение энтропии?
14. В чем заключается сущность проблемы тепловой смерти Вселенной?
15. Какой вывод следует из третьего начала термодинамики?

16. Чем различаются термодинамический и статистический методы исследования?
17. Дайте характеристику термодинамического описания свойств макросистем.
18. Каковы особенности статистического метода описания свойств макросистем?
19. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетических представлений.
20. Какие законы подтверждают молекулярно-кинетические представления?
21. Отметьте этапы развития теории теплоты.
22. Охарактеризуйте вещественную теорию теплоты.
23. В чем заключается несостоятельность вещественной теории тепла?
24. Основные положения корпускулярной теории тепла.
25. Дайте классификацию энергии и энтропии.
26. Определите соотношения Лапласовского детерминизма и необратимого характера термодинамических процессов.
27. Что такое синергетика? Определите роль неравновесной термодинамики в эволюции Вселенной.
28. В чем заключается идея демона Максвелла?
29. Опишите флуктуационную гипотезу Больцмана.
30. Охарактеризуйте инфляционную стадию эволюции Вселенной.

## ГЛАВА 2. САМООРГАНИЗАЦИЯ В ПРИРОДЕ. СИНЕРГЕТИКА

### 2.1. Понятие самоорганизации

Понятие самоорганизации выражает способность сложных систем к упорядочению своей внутренней структуры и переходу от менее сложных к более сложным формам организации вещества. Самоорганизация в сложных и динамичных открытых системах возможна лишь при наличии достаточно большого числа взаимодействующих элементов.

Прежде чем привести примеры самоорганизации, необходимо уточнить, что же считать усложнением элементов и систем, их переходом от более простых к более сложным формам.

Понятие «простой» и «сложный» всегда относительные, их смысл выявляется только при сопоставлении свойств родственных объектов. Так, протон сложен относительно кварков, но прост относительно атома водорода; атом сложен относительно протона и электрона, но прост относительно молекулы и т.д. При этом мы видим, что сложные объекты обладают новыми качествами, которых лишены исходные простые элементы, составляющие их. Таким образом, природу можно представить как цепочку нарастающих по сложности элементов. Процессы объединения «простых» элементов с образованием «сложных» систем протекают лишь при выполнении определенных условий. Например, если температура (энергия) окружающей среды превышает энергию двух частиц, то они не смогут удерживаться вместе. При снижении температуры до значений, при которых энергия среды и энергия связи частиц окажутся равными, наступает критический момент, и дальнейшее снижение температуры делает возможным процесс фиксирования частиц (например, протона и электрона) в атоме водорода.

Намного сложнее обстоит дело при соединении атомов в молекуле. Здесь также существуют пороговые значения параметров (температуры, плотности), называемые критическими, которые отделяют область возможного образования от области, где этот процесс невозможен.

Затем идут новые уровни сложности и упорядоченности вещества. Наиболее высокий уровень упорядоченности, известный науке, демонстрирует феномен жизни и порождаемый им разум. Долгое время считалось, что феномен жизни противоречит господствующим

физическим представлениям о стремлении материи к хаосу. Жизнь представлялась упорядоченным и закономерным поведением материи, основанным не только на тенденции переходить от упорядоченности, но частично и на существовании упорядоченности, которая поддерживается все время. Эта проблема впервые была четко сформулирована в книге известного физика-теоретика Э. Шредингера «Что такое жизнь?». Анализ, сделанный им, показал, что феномен жизни разрушает постулат о единственной тенденции развития вещества – от случайно возникшей упорядоченности к неупорядоченности, рожденной классической термодинамикой. Живые системы оказались способны поддерживать упорядоченность вопреки «естественной» тенденции.

После выхода книги Шредингера создалась любопытная ситуация: за живым веществом признавалась способность проявлять как тенденцию к разрушению упорядоченности, так и тенденцию к ее сохранению. А за неживой природой по-прежнему признавалась только одна тенденция – неизбежно разрушать любую упорядоченность, возникшую в результате случайных отклонений от равновесия. И лишь сравнительно недавно стало ясно, что тенденция к созиданию, к переходу от менее упорядоченного состояния к более упорядоченному, то есть самоорганизация, присуща неживой природе в той же мере, что и живой, нужны лишь подходящие условия для ее проявления.

Идеи самоорганизации высказывались еще в традиционной классической науке XVIII-XIX веках. Эти идеи отражаются в космической гипотезе Канта-Лапласа, рыночной экономической теории Смита, эволюционной теории Дарвина, теории Максвелла-Больцмана, описывающей поведение термодинамических систем и т.д. Примером самоорганизации в природе является так называемый биологический морфогенез. Он представляет собой образование пространственно-временных структур в совершенно однородной биологической среде, например, правильных узоров на крыльях бабочек или регулярных полос на шкурах зебр и тигров. В гидродинамике наблюдается образование в подогреваемой жидкости (начиная с некоторой температуры) шестиугольных ячеек Бенара, в космологии примером самоорганизации служит эволюция галактик и звезд, в экологии – организация сообществ организмов и т.д. Очень интересным примером самоорганизации в химии является реакция отечественного учёного Б.П.Белоусова, открытая им в 1951 году. Реакции такого типа занимают особое место в исследованиях

по пространственно-временной самоорганизации, так как именно они положили начало активному изучению этих явлений. Кроме того, они дают возможность визуального, очень наглядного наблюдения разнообразных (в зависимости от условий) типов структур. Эта реакция происходит в растворе серной и малоновой кислот между сульфатом церия и бромидом калия при добавлении в качестве индикатора феррогена. Самоорганизация проявляется в образовании в жидкой среде концентрических волн и в периодическом изменении цвета раствора. При одних условиях проведения реакции цвет всей реакционной смеси меняется во времени периодически от синего к красному и обратно, т.е. наблюдается чисто временная структура – автоколебания. Период цветовых колебаний в течение реакции сохраняется, что позволяет называть такие реакции «химическими часами». При других соотношениях концентраций происходит возникновение чисто пространственной структуры – расслоение реакционной смеси на чередующиеся чётко локализованные синие и красные области. Наконец, возможно появление центров периодического испускания концентрических или спиральных цветовых волн – автоволн. Описанные явления протекают в химически изолированной системе, наблюдаются в процессе её эволюции от некоторого начального неравновесного состояния к равновесию и при переходе к последнему исчезают. Попытки опубликовать результаты своих опытов Белоусову не удалось, поскольку у авторитетных рецензентов возникли сомнения в возможности осуществления такой реакции. Механизм реакции был вскрыт А.М.Жаботинским. Реакция получила название по именам учёных и стала известна в 80-е годы XX века. В ходе познания выяснилось, что все разномасштабные самоорганизующиеся системы, независимо от того, каким разделом науки они изучаются, будь то физика, химия, биология или социальные науки, имеют единый алгоритм перехода от менее сложных к более сложным и упорядоченным состояниям. Тем самым открывается возможность единого теоретического описания подобных процессов во времени и пространстве. Разработка теории самоорганизации началась буквально в последние годы, причём по нескольким направлениям. Это синергетика (Г.Хакен), термодинамика неравновесных процессов (И.Пригожин), теория катастроф (Р.Том).

## 2.2. Свойства самоорганизующихся систем

Объект изучения классической термодинамики – закрытые системы, т.е. системы, которые не обмениваются со средой веществом, энергией, информацией. Эти системы отличаются жёсткими причинно-следственными связями. Между тем все известные системы на самом деле являются открытыми, а изучаемые в физике закрытые системы есть их идеализация, модель, весьма отличающаяся от действительности. Кроме того, реальные системы в большинстве своём – вероятностные, их развитием управляют случайности, наблюдаемые в них закономерности носят статистический характер, поэтому к ним не применимы в полной мере выводы, полученные классической наукой, и то, что справедливо для закрытых систем, не всегда справедливо для реальных. Именно по отношению к закрытым системам были сформулированы два начала термодинамики. Классическая наука, используя второе начало термодинамики и представление об энтропии как мере хаоса, может объяснить лишь как из порядка возникает хаос, чем обусловлены старение и смерть организмов, разрушение гор, распад цивилизаций, гниение деревьев, взрыв звезды. В классической науке господствовало убеждение, что материи изначально присуща тенденция к разрушению всякой упорядоченности, к исходному равновесию, т.е. к хаосу. Но в окружающем мире наряду с процессами деградации идут процессы созидания порядка из хаоса, процессы, связанные с самопроизвольным уменьшением энтропии: рождаются организмы, появляются новые виды, более приспособленные к среде обитания; растут деревья, возникают новые звёздные системы и новые цивилизации; беспорядочная стая рыб почти мгновенно превращается в косяк, птицы собираются в стаю, популяции пчёл и муравьёв организуют иерархические структуры, при определённых условиях устанавливается равновесие в химическом процессе или возникает система «хищник-жертва». Как получается, что система самопроизвольно переходит из состояния хаоса, наиболее вероятного и выгодного с энергетической точки зрения, в состояние порядка, менее вероятного и менее выгодного (с более высокой энергией)? Как и за счёт чего происходит самоорганизация? Классическая наука затрудняется ответить на эти вопросы. Возникновение нового в природе и социуме казалось невероятным чудом. Только с переходом естествознания к изучению открытых систем появилась такая возможность. Таким

образом, важнейшее свойство самоорганизующихся систем – открытость. Открытые системы – это такие системы, которые поддерживаются в определённом состоянии за счёт непрерывного притока извне вещества, энергии или информации. Постоянный приток вещества, энергии или информации является необходимым условием существования неравновесных состояний в противоположность замкнутым системам, неизбежно стремящимся (в соответствии со вторым началом термодинамики) к однородному (симметричному) равновесному состоянию. Открытые системы – это системы необратимые, в них важным оказывается фактор времени.

Большинство систем Вселенной носит открытый характер, а это значит, что во Вселенной доминируют не стабильность и равновесие, а неустойчивость и неравновесность (асимметрия). Неравновесность, в свою очередь, порождает избирательность системы, ее необычные реакции на внешние воздействия среды. Неравновесные системы имеют способность воспринимать различия во внешней среде и «учитывать» их в своем функционировании. Так, некоторые более слабые воздействия могут оказывать большее влияние на эволюцию системы, чем воздействия, хотя и более сильные, но не адекватные собственным тенденциям системы. Иначе говоря, на нелинейные системы не распространяется принцип суперпозиции: здесь возможны ситуации, когда совместные действия причин А и В вызывают эффекты, которые не имеют ничего общего с результатами воздействия А и В по отдельности. Таким образом, другое важнейшее свойство самоорганизующихся систем – нелинейность. Процессы, происходящие в нелинейных системах, часто носят пороговый характер — при плавном изменении внешних условий поведение системы изменяется скачком. Скачок – это крайне нелинейный процесс, при котором малые изменения параметров системы (обычно они называются управляющими параметрами) вызывают очень сильные изменения состояния системы, её переход в новое качество. Например, при снижении температуры воды до определённого значения она скачком превращается в лёд. Около критической точки перехода достаточно изменить температуру воды (управляющий параметр) на доли градуса, чтобы вызвать её практически мгновенное превращение в твёрдое тело.

Нелинейные системы, являясь неравновесными и открытыми, сами создают и поддерживают неоднородности в среде. В таких условиях между системой и средой могут иногда создаваться отношения обратной

положительной связи, т.е. система влияет на свою среду таким образом, что в среде вырабатываются некоторые условия, которые в свою очередь обуславливают изменения в самой этой системе (например, в ходе химической реакции или какого-то другого процесса вырабатывается фермент, присутствие которого стимулирует производство его самого). Последствия такого рода взаимодействия открытой системы и ее среды могут быть самыми неожиданными и необычными.

Итак, характерные особенности самоорганизующихся систем:

1. открытость системы;
2. нахождение системы вдали от равновесия;
3. нелинейность системы, когда слабые воздействия на нее могут привести к непредсказуемым последствиям;
4. наличие положительной обратной связи.

### 2. 3. Синергетика

Изучением открытых неравновесных систем занимается синергетика. Она возникла на стыке физики и химии в 70-е годы XX века, а затем приобрела статус междисциплинарного подхода.

Синергетика (греч. *sinergia* – совместный, согласованно действующий) изучает процесс развития, общие принципы самоорганизации эволюции сложных систем разного уровня и разной природы, особенности смены их качественных состояний, механизм, динамику и пространственно-временную развёртку этого процесса. У мыслителей Востока (особенно Китая и Индии) синергетика заимствует и развивает далее философские концепции целостности мироздания (все во всем) и идею общего закона, единого пути (пути Дао), которому следуют и мир в целом, и человек в нём. От Запада же она наследует традиции анализа с использованием математического аппарата, опору на эксперимент. Создателем синергетического направления и изобретателем термина «синергетика» является профессор Штутгартского университета и директор института теоретической физики и синергетики Герман Хакен. «Я назвал новую дисциплину синергетика - писал Хакен в предисловии к своей книге «Синергетика» - не только потому, что в ней исследуется совместное действие многих элементов, но и потому, что для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизацией, необходимо кооперирование многих различных дисциплин». Итак, согласно Г.Хакену,



слово «синергетика» имеет два смысла. С одной стороны речь идёт о кооперативном действии элементов сложных систем; с другой – о сотрудничестве учёных разных областей знания. Действительно, лишь когда был накоплен достаточный теоретический и практический опыт, разработан необходимый математический аппарат (теория вероятностей, нелинейная динамика, теория катастроф, системный анализ, топология, теория бифуркации), стало возможным исследование открытых неравновесных систем и появление синергетики. Синергетика – синтетическое направление, она использует достижения математики, естественных наук, а также мощь современных компьютеров.

Выше уже говорилось, что свойство самых различных систем – физических, химических, биологических, экономических и социальных – самоструктурироваться, самоорганизовываться было отмечено задолго до появления синергетики. Но Хакен сумел выделить одно общее свойство всех самоструктурирующихся систем: согласованность, когерентность действия их элементов. С помощью сложного математического аппарата ему удалось описать многие явления самоорганизации. Первоначально сферой приложения синергетики была квантовая электроника и радиофизика. Примером самоорганизации может служить система, изучаемая в разделах квантовой электроники – лазер. Хакен, работавший в лаборатории Белла над новыми источниками света, исследовал механизм кооперативных процессов, которые происходят в твёрдом лазере. Этот прибор создаёт высокоорганизованное оптическое излучение. Традиционные источники света – лампы накаливания, газоразрядные лампы – создают оптическое излучение за счёт процессов, подчиняющихся статистическим законам. Так, в нагретой до высокой температуры среде возбуждённые атомы и ионы спонтанно излучают кванты света с различными длинами волн во всех направлениях. Только малую часть из них мы воспринимаем как видимый свет. Уровень организации подобной среды крайне низок, упорядоченность мала. Для лазерной активной среды, которая должна в принципе находиться в сильно неравновесном состоянии, характерна высокая упорядоченность атомных, ионных или молекулярных избирательно возбужденных состояний, что достигается направленным введением в среду организованного потока энергии (накачка). При выполнении определённого условия в среде лавинообразно нарастает вынужденное излучение почти монохроматических квантов света, движущихся в одном

направлении. Лазерная генерация возникает скачком после того, как плотность вводимой в среду энергии накачки превысит пороговое значение, зависящее от свойств активной среды, характера накачки и параметров оптического резонатора, в который помещают активную среду для усиления эффекта. Излучение выходит в виде узконаправленного луча. Подобные же процессы есть в химии, биологии и т.д. Например, автоколебания цвета в реакционной смеси в ходе реакции Белоусова-Жаботинского означают, что в каждой точке пространства количество актов химического взаимодействия периодически меняется во времени и эти изменения пространственно согласованы, синхронизированы. Согласованное поведение элементов системы наблюдается и в природе и в обществе. Г.И. Рузавин считает, что по такому принципу в человеческом обществе функционирует мораль, которая «возникает из стремления отдельных сообществ или коллективов сохранить себя в процессе борьбы с природой и с другими сообществами людей». Однако на современном этапе истории ситуация постепенно меняется и начинает возникать новая мораль, где на первый план выдвигаются общечеловеческие интересы и ценности, а на место извечной борьбы с природой приходит диалог и сотрудничество с ней. В этом заключено новое понимание и содержание кооперативных процессов. Таким образом, появление когерентности в движении и развитии превращает разобщенное развитие отдельных элементов в согласованное – в кооперативный процесс. При этом возникает новая динамическая структура системы, качественно меняющая ее характер. Механизм самоорганизации начинает действовать в рамках более масштабных и качественно иных структур. Он охватывает уже не отдельные общности людей, а все человеческое сообщество.

Синергетика представляет собой новый этап изучения сложных систем, продолжающий и дополняющий кибернетику и общую теорию систем. Будучи тесно связанной с математическим моделированием и системным подходом к изучению реальности, синергетика расширяет наши представления о самодвижении и развитии материи, взаимосвязи материального и духовного, позволяет по-иному взглянуть на эволюционные процессы в природе, на процессы возникновения жизни и человека, на перспективы человеческой цивилизации. Различают сложные системы с положительной и отрицательной обратной связью. В результате положительной обратной связи внешнее воздействие среды приводит к накоплению внутренних изменений в системе и образованию новых

структур. Именно такая положительная обратная связь реализуется в самоорганизующихся структурах. Отрицательная обратная связь между системой и средой, приводит к тому, что внешнее воздействие среды уменьшается или сводится на нет, а система возвращается к своему инварианту. Если кибернетика занимается проблемой поддержания устойчивости путём использования отрицательной обратной связи, а общая теория систем – принципами их организации (дискретностью, иерархичностью и т.п.), то синергетика фиксирует своё внимание на неравновесности, нестабильности, на множественности и неоднозначности путей их эволюции. Синергетика исследует организационный момент, эффект взаимодействия больших систем. Возникновение организованного поведения может быть обусловлено внешними воздействиями (вынужденная организация) или результатом собственной (внутренней) неустойчивости системы (самоорганизация).

Важное значение для синергетического миропонимания имеет понятие фрактальности (самоподобия). Фракталами обозначают явления масштабной инвариантности, когда последующие формы самоорганизации материальных и социальных систем напоминают по своему строению предыдущие. Такие явления мы довольно часто наблюдаем в природе. Например, наукой давно подмечено, что строение солнечной системы (как и всех звездных систем) в определенной мере подобно строению атома, но различаются на два десятка порядков в пространственно-временных масштабах. Этот факт в той или иной форме отражен как в философских построениях от глубокой древности до наших дней, так и в поэтических образах (Валерий Брюсов «Мир электрона», 1922 г.).

Фрактальные аналогии в синергетике являются одним из методов познания природных и социальных явлений, поскольку часто служат основой для построения научных гипотез и теорий. Например, сходство обращенных друг к другу материков (например, Африки и Южной Америки) послужило основанием для выдвижения гипотезы об их происхождении, как известно затем подтвердившихся. Синергетика, пользуясь данным методом, дает объяснение, почему на тех или иных этапах эволюционного развития повторяются определенные структуры (например, вихревые), раскрывает их роль в процессах самоорганизации в нелинейных системах различных масштабов. История человеческого

общества также дает немало поводов для размышлений на фрактальные темы.

Эвристические возможности синергетики находят применение практически во всех областях знания. В синергетике выделяют шесть главных направлений ее прикладного использования. Во-первых, сложноорганизованным системам нельзя навязать путь их развития. Скорее необходимо понять, как способствовать их собственным тенденциям развития, как выводить общественные системы на эти пути. Проблема управляемого развития принимает, таким образом, форму проблемы самоуправляемого развития. Во-вторых, синергетика демонстрирует нам, каким образом и почему хаос может выступать в качестве созидющего механизма эволюции, как через хаос осуществляется связь разных уровней организации. В-третьих, синергетика свидетельствует о том, что для сложных систем, как правило, существует несколько альтернативных путей развития. Не единственность эволюционного пути, отсутствие жесткой предопределенности сужает основу для позиций пессимизма в смысле конечности судьбы мира и человечества. В-четвертых, синергетика открывает новые принципы суперпозиции, построения сложных развивающихся структур из простых. Понимание общих принципов организации эволюционного целого имеет большое значение для выработки правильных подходов к построению сложных социальных, геополитических ценностей, к объединению стран, находящихся на разных уровнях развития, в мировое сообщество. В-пятых, синергетика дает знание о том, как надлежащим образом оперировать со сложными системами и как эффективно управлять им. В-шестых, синергетика раскрывает закономерности и условия протекания быстрых, лавинообразных процессов нелинейного самостимулирующего роста. Она позволяет понять, как инициировать такого рода процессы в открытых нелинейных средах, например, в среде экономической, и какие существуют требования, позволяющие избегать вероятностей распада сложных структур вблизи моментов максимального развития.

Синергетические закономерности обнаруживают себя как в материальном мире косной (неорганической) природы, так и в мире живой природы, в том числе и в социуме.

Становление синергетики создает новую теоретико-методологическую парадигму исследования природных и социальных явлений. Она, по мнению Г.И. Рузавина, позволяет «проанализировать и

свести в единое целое многие результаты, полученные в астрономии и космологии, физике и химии, биофизике и биохимии, генетике и молекулярной биологии, геологии и экологии, относящиеся к различным аспектам микро- и макро - эволюции». Тщательный анализ с позиции синергетического подхода накопленных фактов и фундаментальных открытий в современной науке будет способствовать углублению, уточнению и конкретизации важнейших положений научных теорий о развитии материи, сущности жизни, Разума и перспективах человеческой цивилизации. По ряду важнейших аспектов познания следует ожидать радикальных перемен в мировоззренческих установках, в объяснении загадок природы.

До появления синергетики считалось, что существует непреодолимый барьер между неорганической и органической живой природой. Лишь живой природе присущи эффекты самоорганизации и самоуправления. Синергетика перекинула мост между неорганической и живой природой. Она пытается ответить на вопрос, как возникли те макросистемы, в которых мы живём. Наряду с процессами самоорганизации, синергетика рассматривает и вопросы самодезорганизации – возникновения хаоса в динамических системах.

## **2.4. Неравновесная термодинамика и. Пригожина. Закономерности самоорганизации**

Основы неравновесной термодинамики были заложены работами бельгийского учёного Ильи Пригожина и его группы. В 1977 году работы Пригожина по теории необратимых процессов в открытых неравновесных системах были удостоены Нобелевской премии. Пригожин отметил, что задачей новой термодинамики, способной отражать скачкообразные процессы, является доказательство того факта, что неравновесие может быть причиной порядка.

Чтобы система могла не только поддерживать, но и создавать упорядоченность из хаоса, она непременно должна быть открытой и иметь приток энергии и вещества извне. Именно такие системы названы Пригожиным диссипативными. Весь доступный нашему познанию мир состоит именно из таких систем, и в этом мире повсюду обнаруживается эволюция, разнообразие форм и неустойчивость. Диссипация означает рассеяние, потери энергии, возникающие в неравновесных системах. Так

как неравновесность, то есть неодинаковость параметров системы, вызывает потоки тепла и массы, то для поддержания порядка требуется компенсация потерь, к которым приводят необратимые «выравнивающие» потоки и, следовательно, для этого нужны определенные энергетические затраты. Происходит перевод (спуск) избытков поступлений вещества и энергии на нижележащие уровни (в более простые формы) или вывод их за пределы системы. Диссипация означает, таким образом, переструктурирование чужого в своё и рассеяние лишнего. Если подпитку системы энергией прекратить, то она перейдет в состояние равновесного порядка. Диссипативным системам для их поддержания требуется больше энергии, чем для поддержания более простых, на смену которым они приходят. В условиях диссипации часто возникает порядок.

Механизм самоорганизации по И. Пригожину выглядит следующим образом.

Состояние системы в любой момент времени можно представить как точку в некотором воображаемом пространстве, где параметры (характеристики системы) будут играть роль координат. Такое пространство называют фазовым. В результате обмена веществом, энергией и информацией с другими системами, а также случайных малых отклонений от равновесия (флуктуаций) с течением времени параметры системы изменяются, происходит смена состояний, точка перемещается внутри фазового пространства и описывает так называемую фазовую траекторию (пересекающиеся кривые, спирали, замкнутые линии с общим центром) (Рис.1).

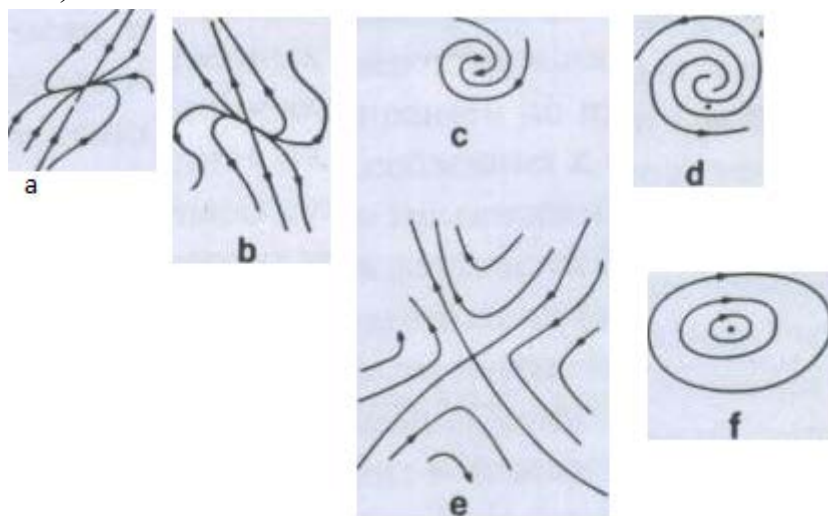


Рис. 1. Фазовые траектории в окрестностях особых точек: а — устойчивый узел; б — неустойчивый узел; с — устойчивый фокус; д — неустойчивый фокус; е — седло; ф — центр

Если система удалена от точки термодинамического равновесия, то возникающие в ней флуктуации будут усиливаться. Чем сложнее системы, тем более многочисленны типы флуктуаций, угрожающих ее устойчивости. Таким образом, в ходе эволюционного этапа развития диссипативная система достигает состояния сильной неравновесности и теряет устойчивость. Это критическое состояние называется точкой бифуркации, т.е. точкой, в которой возможно множество вариантов дальнейшего развития системы. Примерами бифуркаций являются, например, состояние выбора человеком варианта поступления в высшее учебное заведение; состояние популяции при выборе под влиянием внешней среды варианта дальнейшего развития в борьбе за существование; точки ветвления на генеалогическом (родословном) дереве; точки перехода к разным вариантам продолжения диалога «студент-компьютер» в процессе тестирования знаний студента с использованием закрытых тестов (когда предполагается выбрать правильный и полный ответ); состояние борьбы двух фронтов в атмосфере с возможными вариантами погодных условий. Наглядно-образное представление о точке бифуркаций дает картина В.М. Васнецова «Рыцарь на распутье». С ситуацией выбора каждый человек сталкивается ежеминутно в обыденной жизни, производственной или общественной деятельности. Математически это выражается во множестве решений нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих сложную систему, графически – это точки пересечения фазовых траекторий (рис. 1).

Точки бифуркаций – это также особые физические точки – точки равновесия, которое может быть как устойчивым, так и неустойчивым. Для синергетики интерес представляют именно неустойчивые состояния, т.к. они дают возможность перехода системы в новое качественное состояние, новый режим, которому будет отвечать новый тип поведения системы. В точках бифуркаций перед самоорганизующейся системой открывается множество вариантов путей развития (поле), и одновременно, возникает множество микроструктур – прообразов будущих состояний системы. Но, как правило, большинство из них оказываются «невыгодными» с точки зрения системы. Та траектория или направление, которое отличается от других относительной устойчивостью, иными словами, является более реальным, называется аттрактором. Аттрактор (от лат. - притягивать) – это относительно устойчивое состояние системы, притягивающее к себе множество «линий» развития возможных

бифуркаций. Наглядно это можно представить в виде конуса бытовой воронки, направляющего движения частиц жидкости и сыпучих тел (например, песка) к своему центру (вершине конуса – горловине воронки) независимо от первоначальных траекторий. Пространство внутри конуса воронки (аттрактора), где любая частица (система) туда попавшая постепенно смещается в заданном направлении, называют «зоной аттрактора».

Различают несколько разновидностей аттрактора, среди которых следует выделить так называемый «странный аттрактор». При состояниях системы, характеризуемых странным аттрактором, становится невозможным определить поведение частиц в каждый данный момент, хотя мы уверены, что они находятся в зоне аттрактора. Фазовый портрет странного аттрактора – это не точка и не предельный цикл, как это имело место для устойчивых, равновесных систем, а некоторая область, по которой происходят случайные блуждания. С помощью алгоритмов странного аттрактора наука выходит на описание изменений в климате, погодных процессов, движения некоторых небесных тел, поведения многих элементарных частиц, явлений тепловой конвекции и т.д. В точке бифуркации система как бы «колеблется» перед выбором того или иного пути развития. При этом принципиально неизвестно, в каком именно направлении это развитие пойдет. Однако спрогнозировать будущее открытой неравновесной системы оказывается невозможным. В таких случаях чрезвычайно важны случайные флуктуации. От их величины и направления зависит, по какой из возможных траекторий система будет выходить из состояния неустойчивости. Флуктуации могут усиливаться за счет случайных или целенаправленных внешних воздействий, которые, действуя в резонанс, «подталкивают» систему к выбору траектории развития. Таким методом часто пользуются для управления социальными, экономическими, педагогическими, экологическими, технологическими и другими системами. Дезорганизация и случайности на микроуровне выступают созидательной силой, упорядочивающей состояние системы на макроуровне.

Самопроизвольное развитие систем идет не вопреки, а согласно законам природы. Из огромного числа вариантов остается оптимальный. «Выбрав» его, система продолжает поступательное развитие до следующей точки бифуркации, т.е. пока в силу каких-либо причин не придет в неустойчивое состояние. Эти причины связаны с



несоответствием внутреннего состояния открытой системы внешним условиям среды. Вначале идет медленное накопление изменения до состояния неустойчивости. И опять у системы возникает множество вариантов развития, причем переход количественных изменений в качественные, как правило, осуществляется скачком. Наглядно этот процесс представлен на рис. 2.

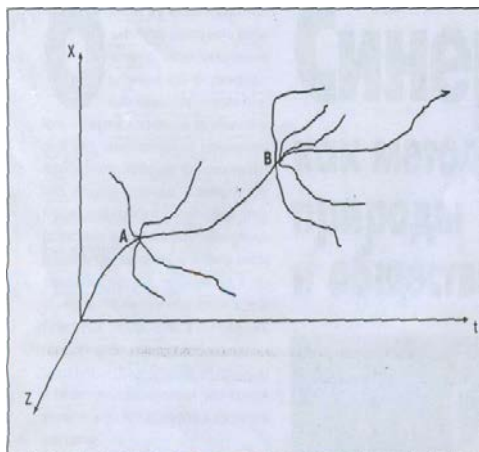


Рис. 2. Бифуркационный характер эволюции системы:  $x, z$  – параметры системы,  $t$  – время,  $A$  и  $B$  – точки бифуркации.

В результате скачков в системе происходят кардинальные (революционные) изменения, что вовсе не значит, будто эти изменения обязательно разрушают систему (как это происходит иногда при социальных революциях). Система может перейти в новое, качественно более высокое состояние, сохраняя из старого то, что приемлемо и способствует ее устойчивости в новом состоянии. По такому пути идет развитие абсолютно всех систем, но скорость этого процесса в разных системах различна. Эволюция живого вещества продолжается уже миллиарды лет, эволюция общества – несколько десятков тысяч, в искусственных условиях (технологических, химических и других системах) она длится от нескольких минут до нескольких суток.

Эволюция системы проходит через бифуркации и случайность от хаоса через промежуточные простые структуры к сложноорганизованным. Ее вектор направлен по пути отбора более приспособленных к внешним условиям. При этом иногда происходит усложнение и достигается высокая степень организации (что мы наблюдаем на примере эволюции головного мозга, цивилизации, совершенствовании технических и технологических систем), а иногда – упрощение. Эволюционный процесс

представляет собой лабиринт со множеством тупиков, среди которых система находит «верный» путь – путь, приемлемый с точки зрения фундаментальных законов мироздания. Это законы сохранения вещества, энергии, количества движения и т.д., которые никому не дано нарушать. Оказалось, что эти законы обладают удивительной особенностью. Они допускают вариационную трактовку. Это означает, что они могут быть сформулированы в терминах минимизации некоторой величины. Например, при любом перемещении физической частицы в пространстве или любом изменении физической величины во времени законы сохранения как бы выбирают самую экономную траекторию. Так, известный закон о равенстве углов падения и отражения светового луча можно было бы при желании сформулировать следующим образом: луч света должен отразиться от поверхности таким образом, чтобы общая длина пути, которую ему предстоит пройти, оказалась, в конечном счете минимальной. Законы Ньютона, как показал впервые еще в 18 веке французский ученый Мепертьюи, также допускают вариационную формулировку. Существование вариационных принципов создает представление о том, что в природе существует некая «высшая целесообразность», а физическая частица, начиная свое движение, как бы уже заранее соотносится с конечным результатом. Добрую сотню лет вокруг вариационных принципов кипели страсти, пока математики не показали, что такая «разумность» законов механики не связана с какой-то специфической, извне заданной разумностью природы, а неизбежно вытекает из законов сохранения. Следовательно, достаточно наиболее общего и очевидного закона материального мира – ничего не возникает из ничего и не пропадает в никуда, - чтобы заранее заставить природу делать «разумный» и «целенаправленный» выбор. Тогда метафора «стратегия природы» оказывается все более точной и содержательной. Это следствие более глубокого понимания законов того мира, в котором мы живем. С ростом сложности системы растет и вероятность увеличения числа возможных путей развития, т.е. дивергенции, а вероятность появления двух развивающихся систем в одном и том же канале эволюции практически равна нулю. Это и означает, что процесс самоорганизации ведет к непрерывному росту числа организационных форм. Благодаря этому мы наблюдаем то великое разнообразие простых и сложных биологических организмов, определенные соотношения между которыми и обуславливают устойчивость биосферы Земли. Нарушение этого

соотношения в результате деятельности человека или глобальных природных катаклизмов может привести к необратимым катастрофическим последствиям (поэтому мы и говорим о необходимости охраны природы).

Процесс усложнения бесконечен, нет предела совершенству. Но при этом всегда есть внешние факторы (потоки информации, энергии, вещества), которые как бы подталкивают систему к самоорганизации. Например, самоорганизация биосферы осуществляется благодаря энергии солнца, работа лазера – благодаря энергии накачки и т.д.

Описанный механизм самоорганизации (по Пригожину – «порядок через флуктуацию») реализуется абсолютно во всех системах – от атомов до галактик, от отдельных клеток до человеческих существ и вплоть до обществ и культур.

Проблемами самоорганизации занимается также теория катастроф. Катастрофами называют скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий. Эта теория дает универсальный метод исследования скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений.

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.

## **2.5. Самоорганизация вселенной**

Вопрос о возникновении Вселенной для многих поколений ученых был предметом их научного поиска. В истории науки существовало множество гипотез, отвечающих на этот вопрос.

Уместно задать вопрос: вправе ли мы рассматривать Вселенную как самоорганизующуюся систему, самую большую из всех, с которыми приходится иметь дело науке? Распространимы ли на эту систему принципы, выработанные в настоящее время для самоорганизующихся систем земного масштаба? Ответить на эти вопросы не просто, огромная разница в масштабе и степени сложности, недостаточность знаний о Вселенной и о самоорганизации требуют проявления осторожности в

выводах. С другой стороны, оптимизм порождают блестящие итоги распространения на Вселенную экспериментальных и теоретических результатов изучения строения вещества в земных условиях, восстановление на этой основе главных особенностей истории ее развития, убежденность в универсальности открытых наукой законов физики.

Происхождение, эволюция и устройство Вселенной как целого изучается космологией (*kosmos* – вселенная, *logos* – закон). Современная космология представляет собой синтез научных и философских знаний. Именно этим определяется ее специфика. Дело в том, что размышляя о происхождении и устройстве Вселенной, наши знания эмпирически трудно проверяемы и существуют в виде теоретических гипотез или математических моделей. Космолог движется от теории к практике, от модели к эксперименту, в этом случае роль исходных философских и общенаучных оснований существенно возрастает.

Современная космология возникла в начале 20 века после создания общей теории относительности. Первая модель была построена А. Эйнштейном и описывала стационарную Вселенную. Несмотря на новизну и даже революционность идей, А. Эйнштейн в своей космологической теории ориентировался на привычную мировоззренческую установку статичности мира: А. Эйнштейна более привлекал гармоничный и устойчивый мир, нежели мир противоречивый и неустойчивый. В конце жизни великий ученый с сожалением говорил о том, что теория статичной Вселенной не имеет эмпирического подтверждения.

В 1922 году российский математик и физик А. Фридман выступил с критикой теории А. Эйнштейна. Он предложил три модели Вселенной. В первой рассматривал случай средней плотности вещества и неискривленности пространства. В такой ситуации вселенная должна бесконечно расширяться из некоторой исходной точки. Во второй модели предполагалась плотность вещества меньше критической. В этом случае пространство обладает отрицательной кривизной, а Вселенная также должна неограниченно расширяться от начальной точки. В третьей модели рассматривался случай плотности вещества выше критической. В этой ситуации пространство должно иметь положительную кривизну, а Вселенная периодически расширяться и сжиматься.

Концепция А. Фридмана некоторое время не имела эмпирического обоснования. Однако в 1929 году физик Эдвин Хаббл обнаружил эффект «красного смещения» в спектрах удаленных галактик. «Красное смещение» означает понижение частот электромагнитного излучения (линии видимого спектра смещаются в сторону более длинных красных волн) при удалении источника света от наблюдателя. Исследования Э. Хаббла подтвердили, что удаленные от нас галактики разбегаются, т.е. Вселенная находится в состоянии расширения, а значит нестационарна. В 1927 году бельгийским ученым Ж. Леметром было введено понятие сингулярности как исходного состояния Вселенной. Ж. Леметр предположил, что первоначальный радиус Вселенной по размерам был близок к электрону, и она имела бесконечную плотность ( $10^{96}$  г/см<sup>3</sup>). В 1965 году С. Хокинг математически обосновал необходимость сингулярности в любой модели расширяющейся Вселенной. Известные законы физики в сингулярности не работают. Причины возникновения такого начального состояния, а также характер пребывания материи в таком состоянии считаются неясными и выходящими за рамки компетенции любой современной физической теории. Долгое время ничего нельзя было сказать о причинах перехода Вселенной к расширению, но сегодня появились некоторые гипотезы, пытающиеся объяснить эти процессы. В 40-е годы 20 века наступил новый этап развития космологии: чтобы объяснить расширение Вселенной американский физик Г. Гамов (эмигрировал из СССР в 1934 году) предложил модель Большого Взрыва. Согласно этой гипотезе, Вселенная возникла 12-18 млрд. лет назад в результате взрыва из первоначального состояния сингулярности. Не вызывает сомнений, что исходное состояние было неустойчивым, породившим взрыв, скачкообразный переход к расширяющейся Вселенной. Это, очевидно, было самое простое состояние из всех, реализовавшихся позднее. В нем было нарушено все, что нам привычно: формы материи, законы, управляющие их поведением, пространственно-временной континуум. Такое состояние можно назвать хаосом, из которого в последующем развитии системы шаг за шагом формировался порядок.

Гипотезу Большого Взрыва называют также моделью горячей Вселенной или стандартной моделью. Самой большой проблемой этой гипотезы остается состояние сингулярности, введение которого требуется уравнениями общей теории относительности А. Эйнштейна. Для

прояснения первых мгновений существования Вселенной, прояснения причин Большого Взрыва и объяснение сингулярности физиком А. Гутом была предложена инфляционная гипотеза или модель инфляционной Вселенной. На данном этапе развития науки инфляционная концепция не может получить прямого эмпирического подтверждения, однако она предсказывает новые факты, которые в принципе могут быть проверены. Инфляционная теория описывает эволюцию Вселенной начиная с  $10^{-45}$  с после расширения. Модель раздувающейся («инфляция» - вздутие) Вселенной не противоречит гипотезе Большого Взрыва, включая ее в качестве своего частного случая. Различие между концепцией Большого взрыва и концепцией инфляционной Вселенной касается только первых мгновений существования мира – до  $10^{-33}$  с, принципиальных расхождений между этими гипотезами нет.

Согласно инфляционной модели первоначальное состояние Вселенной – вакуум, особая форма материи, характеризующаяся высокой активностью. Вакуум как бы «кипит», в нем постоянно рождаются и уничтожаются виртуальные частицы. Возникновение частиц из вакуума описывается понятием флуктуации. Вакуум может находиться в состояниях, характеризующихся разными энергиями. Если вакуум возбужден (ложный вакуум), то в процессе порождения и уничтожения частиц возникает огромная сила космического отталкивания, которая и приводит к раздуванию «пузырей» - зародышей Вселенных. Исходное состояние ложного вакуума можно сравнить с кипением воды в котле. Каждый из «пузырей» - домен, отдельная Вселенная, характеризующаяся собственными значениями фундаментальных постоянных. Считается, что наша Вселенная – один из «пузырей», возникших из вакуумной пены.

Раздувание или быстрое расширение Вселенной было названо инфляцией. На фазе инфляции примерно в промежутке с  $10^{-43}$  до  $10^{-34}$  с формируются пространственно-временные характеристики. Таким образом, в рамках инфляционной модели предполагается существование мира без пространства и времени. Примерно через  $10^{-34}$  с начала расширения неустойчивый вакуум распадается, а силы космического отталкивания иссякают. В силу того, что распад частиц и античастиц идет по-разному, во Вселенной образуется незначительное преобладание вещества над антивеществом: на миллиард античастиц образуется миллиард плюс одна частица. Удовлетворительных объяснений этой асимметрии пока не найдено. Предполагают, что в этом «повинны»

слабые взаимодействия. Именно это избыточное вещество и стало «материалом» для Вселенной. Нарушение симметрии между веществом и антивеществом привело к нарушению равновесности системы, и она перешла в новое состояние, изменив структуру. Расширение Вселенной сопровождается понижением температуры. На этом этапе Вселенная пуста, в ней нет ни излучения, ни вещества. Однако энергия, которая выделилась при распаде ложного вакуума, идет на мгновенный нагрев Вселенной до температуры примерно  $10^{27}$  К. Происходит своеобразная вспышка света. Энергия, мгновенно разогревшая Вселенную, сейчас понимается как суперсила, которая объединила все известные четыре типа взаимодействий: гравитационное, сильное, слабое и электромагнитное.

На этом заканчивается стадия инфляции и начинается эволюция горячей Вселенной, описываемая моделью Большого Взрыва. Через  $10^{-12}$  с после Большого Взрыва температура Вселенной составляла около  $10^{15}$  К. В это время начинается образование известных нам частиц и античастиц. При температуре  $10^{13}$  К кварки начинают объединяться в группы, образуя адроны – протоны и нейтроны и единая суперсила распадается на гравитационное, сильное, слабое и электромагнитные взаимодействия. В конце первой секунды после Большого Взрыва температура Вселенной составляет  $10^{10}$  К. При температуре примерно 1 млрд. градусов становятся возможными процессы нуклеосинтеза, т.е. соединение протонов с нейтронами. Соединение протона с нейтроном создает ядро дейтерия, с двумя нейтронами – ядро трития. Это два из известных изотопов водорода. Образование же ядер других элементов требует, казалось бы, невозможного - объединения двух и более числа протонов. В конце 20-х годов Г. Гамов и другие ученые указали возможный путь нуклеосинтеза, в его основе лежит процесс нерезонансного захвата нейтрона протоном. В таком процессе захваченный нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино ( $\beta$ -распад), при этом образуется устойчивое ядро из двух протонов. После присоединения к нему одного или двух нейтронов образуется ядро гелия. Казалось бы открывается прямой путь для последовательного образования ядер всех элементов. Однако в природе переходы от простого к сложному нередко отличаются от наиболее простых и, в нашем представлении, логичных путей. Так произошло в случае нуклеосинтеза в ранней Вселенной. На пути его прямого развития встали элементы с «магическими» числами 5 и 8. Дело в том, что любая комбинация протонов и нейтронов, образующая ядро с атомным весом 5

или 8, оказывается нежизнеспособной, она распадается быстрее, чем образуется. Этот барьер на пути нуклеосинтеза физики назвали «щелью масс». Таким образом, первичный нуклеосинтез в начальной фазе развития Вселенной не мог образовать наблюдаемого сейчас разнообразия химических элементов. Барионное вещество ранней Вселенной (ядра водорода и гелия) составляло ничтожную часть. Основными компонентами были фотоны (69%) и нейтрино (31%). Температура была еще очень высокой, порядка 700 тыс. градусов, поэтому соединение электронов с ядрами (рекомбинация) и образование атомов было невозможно. В этих условиях фотоны взаимодействовали со свободными электронами (от нерезонансного захвата) и смесь барионов была не прозрачной для излучений. Последующие примерно 500 тыс. лет Вселенная продолжала остывать по мере расширения. Когда плотность ее снизилась до  $10^{-22}$  г/см<sup>3</sup>, а температура составила примерно 3000 К, электроны получили возможность прочно соединиться с ядрами, образуя устойчивые атомы H<sub>2</sub> и He. Свободные электроны быстро исчезли, в результате прекратилось их взаимодействие с фотонами, и барионное вещество стало прозрачным. Излучение отделилось от вещества и образовало то, что в нашу эпоху назвали реликтовым излучением. Еще Гамов предполагал, что в качестве следов от Большого Взрыва должно остаться микроволновое излучение малой энергии, соответствующее излучению абсолютно черного тела, нагретого всего лишь до 5 К. Предположение Гамова длительное время не принимали всерьез. Однако в начале 1965 года американцы А.А. Пензиас и Р.В. Вилсон, обеспечивая связь со спутником «Эхо», изучали «радиозумы» Галактики. Неожиданно для себя они обнаружили приходящее со всех сторон фоновое излучение, температура которого составляла около 3 К. Первооткрыватели ничего не знали о его космологической значимости. Но многие космологи едва ли не в одночасье поняли, что сделано открытие фундаментальной важности. Абсолютное большинство космологов убеждено, что наличие реликтового излучения свидетельствует в пользу модели Большого Взрыва, или горячей Вселенной.

После рекомбинации Вселенная содержала смесь трех почти не взаимодействующих субстанций: лептонов (нейтрино и антинейтрино), реликтового излучения (фотоны) и барионного вещества (атомы H<sub>2</sub>, He и их изотопы). В сложившихся к этому времени условиях ни одно из четырех фундаментальных взаимодействий не могло обеспечить



протекание процессов нарастания сложности и упорядоченности вещества. Казалось бы, что в перспективе остается дальнейшее расширение и остывание Вселенной, завершающееся образованием «лептонной пустыни» (что-то вроде «тепловой смерти»). В развитии наступил явный кризис. Но выход нашелся, произошел скачок, создавший современную структурную Вселенную, для которой равновесность противопоказана.

До начала процесса рекомбинации развитие Вселенной шло через последовательные преобразования вакуума и вещества, достижения в ходе таких преобразований все более высоких уровней упорядоченности. Процесс протекал путем глобального охвата всей Вселенной как целого. Движущей силой самоорганизации служили глубинные свойства вакуума и вещества и особенности их проявления в экстремальных условиях начального периода развития. В дальнейшем эту роль взяли на себя четыре фундаментальные силы природы.

Присущи ли Вселенной как системе признаки, с точки зрения научных критериев, характеризующие ее как самоорганизующуюся (диссипативную) систему, и выполнялись ли на рубеже этапа рекомбинации условия, необходимые для перехода системы в качественно новое состояние? Прежде всего, Вселенная как система должна быть открытой, т.е. обмениваться энергией или веществом с некоей окружающей средой. Но что можно считать окружающей средой Вселенной? Во всех скачкообразных переходах ранней Вселенной источником Вселенной были физический вакуум и те фазовые переходы, которые в нем протекали. Взаимоотношения вещественной Вселенной и вакуума пока остаются для нас загадкой, к тому же вакуум и вещество неразделимы, как неотделимы северный и южный полюса магнита. Как предположение можно считать вакуум внешней средой вещественной Вселенной, формальных противопоказаний для этого не видно.

Далее, диссипативные системы сугубо неравновесны. Вселенная достигла рубежа рекомбинации с заметными отклонениями от равновесности: в ней нарушен равновесный состав вещества и антивещества (барионная асимметрия), она состоит из почти не взаимодействующих между собой частей (нейтринный газ, реликтовое излучение, барионное вещество), каждая из них имеет свою температуру, отличную от температуры других частей, нарушена равновесность составов. Все это следует рассматривать как типичные признаки

неравновесности системы, порождающие в определенных условиях ее неустойчивость.

По мере того как возможности дальнейшего развития водородно-гелиевой Вселенной были исчерпаны, произошел скачок системы в новое качественное состояние – во Вселенной возникли разномасштабные структуры, находящиеся в сугубо неравновесном состоянии.

Предполагается, что в расширяющейся Вселенной возникают и развиваются случайные уплотнения вещества. Силы тяготения внутри проявляют себя заметнее, чем вне их. Поэтому, несмотря на общее расширение Вселенной, вещество в уплотнениях притормаживается, и его плотность постепенно нарастает. Проявление таких уплотнений и стало началом рождения крупномасштабных структур во Вселенной. Согласно расчетам, из этих сгущений должны были возникать плоские образования, напоминающие блины. Сжатие водородно-гелиевой плазмы в «блины» неизбежно приводило к значительному повышению их температуры. В конечном счете, сжатие «блина» порождало его неустойчивость, и он распадался на более мелкие подсистемы, которые, возможно, стали зародышами галактик. Подсистемы, в свою очередь, достигали состояния неустойчивости и распадалась на более мелкие уплотнения, ставшие зародышами звезд первого поколения.

Образование разномасштабных структур во Вселенной открыло возможность для новых усложнений вещества. Важнейшим моментом стало образование всей совокупности элементов таблицы Менделеева. Они появлялись в звездах в ходе процессов нуклеосинтеза. Как же звездный нуклеосинтез преодолел «щель масс»? Идея механизма такого преодоления впервые была высказана английским астрофизиком Ф. Хойлом (р. 1915) (многим он известен как автор интересных фантастических произведений). Хойл высказал идею: на определенных стадиях развития некоторых типов звезд появляются условия для объединения трех ядер гелия в ядро углерода  $^{12}\text{C}$ . Такая реакция решает проблему преодоления «щели масс», оставляя позади сразу оба барьера. Далее открываются возможности образования еще более тяжелых, чем углерод, ядер неона, кислорода, кремния и др.

Однако теоретические расчеты скорости реакции соединения трех ядер гелия в ядро углерода показали, что она недостаточна для создания наблюдаемого в мире количества тяжелых элементов. Казалось бы, по хойловской концепции нанесен непоправимый удар. Но сам Хойл не

допускал мысли об ее ошибочности. Выход из создавшегося положения он нашел в предположении, что у ядра углерода  $^{12}\text{C}$  должно существовать возбужденное состояние, энергия которого равна (или очень близка) суммарной энергии трех альфа-частиц. Известно, что атомное ядро (как и сам атом) может иметь либо минимальную присущую ему энергию (основное состояние ядра), либо ряд более высоких значений энергии, отличающихся от минимальной на определенные дискретные значения (возбужденные состояния). Если у ядра  $^{12}\text{C}$  существует возбужденное состояние с энергией, примерно равной суммарной энергии трех ядер гелия, то реакция их объединения с образованием возбужденного ядра углерода будет протекать избирательно со скоростью, на несколько порядков превышающей скорость неизбирательной реакции, создающей ядро углерода в основном состоянии.

Дело оставалось за малым: нужное возбужденное состояние ядра углерода не было известно физикам и надо было поискать его экспериментально. И тут случай свел теоретика Ф. Хойла с блестящим американским экспериментатором У. А. Фаулером (р. 1911), одним из основателей нового направления в космологии — ядерной астрофизики. Особенностью созданной им школы было проведение широкого поиска ответов на многие вопросы ядерной космологии с помощью лабораторных опытов. На Фаулера сильное впечатление произвела неистовая уверенность Хойла в правоте своей гипотезы. В лаборатории началось изучение возбужденных состояний ядра углерода и, к удивлению самих экспериментаторов, искомый уровень был обнаружен! Его энергия, равная 7,654 МэВ, всего на 0,38 МэВ превышала суммарную энергию трех объединяющихся альфа-частиц. Это была победа, идея звездного нуклеосинтеза тяжелых элементов получила весомое подтверждение.

Согласно современным представлениям, присутствующие в межзвездной среде тяжелые элементы появились в звездах типа красных гигантов. Желтые карлики типа нашего Солнца поддерживают свое состояние главным образом в результате ядерной реакции, превращающей водород в гелий. На самом деле речь идет о цикле последовательно протекающих реакций, названных водородным циклом. Так что звезды этого типа не создают элементов тяжелее гелия. Красные гиганты обладают массой, в несколько раз превышающей солнечную, водород в них выгорает очень быстро. В центре, где сосредоточен гелий, их температура достигает нескольких сотен миллионов градусов, что

оказывается достаточным для протекания реакций углеродного цикла. В этом цикле три ядра гелия соединяются и образуют возбужденное ядро углерода. Оно в свою очередь может присоединить еще одно ядро гелия и образовать ядро кислорода, затем неона и так вплоть до кремния. Выгорающее ядро звезды сжимается и температура в нем поднимается до 3—10 млрд. градусов. В таких условиях реакции объединения продолжают вплоть до образования ядер железа.

Ядро железа — самое устойчивое во всей последовательности химических элементов. Здесь проходит граница, выше которой нуклеосинтез перестает быть источником выделяющейся энергии протекание реакций с образованием еще более тяжелых ядер требует энергетических затрат. Образование элементов от гелия до железа происходит с участием только заряженных частиц (протонов, альфа-частиц и т. д.) Дальнейшее же усложнение возможно только в реакциях с участием нейтронов. Что же касается ядер  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ , то их существование в очень малых концентрациях объясняют тем, что они "откололись" от более тяжелых ядер в межзвездном пространстве под действием космических лучей. Прямые процессы их образования, видимо, отсутствуют.

Появление во Вселенной всей гаммы химических элементов открыло новый этап в развитии вещества и в формировании ее структур. В местах нахождения разнообразных химических элементов протекают процессы их объединения в молекулы, сложность которых, как оказалось, может нарастать до очень высоких уровней. Молекулы обладают качественно новыми свойствами по сравнению с атомами, и чем сложнее молекула, тем разнообразнее и богаче эти свойства. Открывается простор для практически безграничных вариаций, что в сочетании с неравновесностью открытых систем, собранных из молекул, создает условия для последовательного достижения все более высоких уровней упорядоченности.

Причину, заставляющую атомы объединяться в молекулы, наука знает достаточно хорошо. В основе этих процессов — химические силы, за которыми скрывается одна из фундаментальных сил природы — электромагнитное взаимодействие. Процессы соединения атомов в молекулы широко распространены во Вселенной. В межзвездной среде, где концентрация вещества ничтожно мала, тем не менее обнаруживаются молекулы водорода. Там же встречаются мельчайшие пылинки, в их

основе – кристаллы льда или углерода с примесью гидратов разных соединений. Молекулярный водород вместе с гелием образует газовые межзвездные облака. Скопление газов вместе с пылинками формирует газо - пылевые облака. Но самое интересное, с чем столкнулись наблюдатели, - это неожиданно большое присутствие в космосе разнообразных органических молекул, вплоть до таких сложных, как молекулы некоторых аминокислот. В межзвездных облаках насчитали более 50 видов органических молекул. Еще удивительнее, что органические молекулы находят во внешних оболочках некоторых не очень горячих звезд и в образованиях, температура которых незначительно отличается от абсолютного нуля. Так что синтез молекул, в том числе и органических, - распространенное и вполне обыденное явление в космосе. Правда, наука пока не может с уверенностью назвать конкретные пути протекания такого синтеза.

В связи с этим невольно возникает вопрос, способно ли усложнение вещества достигнуть самых высоких уровней вне планет, в межзвездной среде или в оболочках не очень горячих звезд? Иначе говоря, возможна ли там жизнь?

Эта тема неоднократно обыгрывалась в научно-фантастических произведениях, но современная наука не позволяет дать ни положительного, ни отрицательного ответа на этот вопрос. Пока мы знаем только один вариант жизни в Космосе – на Земле.

Наличие тяжелых химических элементов, а также молекул и их соединений обеспечивает возможность образования около некоторых звезд второго поколения планетных систем типа солнечной. В таких системах становится возможным протекание геологической и химической эволюции.

Таким образом, происхождение и эволюция Вселенной – это пример грандиозного процесса самоорганизации в Природе.

## **2.6. Экономическая синергетика**

Итак, в предыдущих главах мы выяснили, что синергетические системы – открытые, нелинейные, неравновесные, самоорганизующиеся системы – не поддаются моделированию традиционными методами в силу их сложности, разнообразия, многомерности, высочайшего уровня

неопределенности. Особенности трудности вызывают бифуркационные участки развития.

Экономические системы обладают всеми признаками синергизма. Долгосрочное экономическое развитие равноправно включает эволюцию и революцию (катастрофы, бифуркации), линейность и нелинейность, устойчивость и неустойчивость, стабильность, нестабильность и лабильность, равномерность, ускорения, замедления и другие процессы. Всем известно правило математики, согласно которому от перемены мест слагаемых сумма не меняется. Однако физические, химические, биологические процессы могут протекать так, что совместное действие независимых элементов системы обеспечивает увеличение их общего эффекта до величины большей, чем сумма эффектов этих же элементов, действующих независимо (явление эмерджентности). Математически это выглядит так:

$$\Phi(x_b, x_e, x_u) > [\Phi(x_b) + \Phi(x_e) + \Phi(x_u)]$$

где  $x_b$  – вещественные факторы, вступающие в процесс;

$x_e$  – энергетические факторы, вступающие в процесс;

$x_u$  – информационное проявление процесса.

$\Phi(x_b), \Phi(x_e), \Phi(x_u)$  – функции(результат) взаимодействия вещества, энергии и информации в процессе.

В экономике сплошь и рядом возникают ситуации, в которых от характера складывания, комбинирования факторов производства зависит конечный итог, результат этого комбинирования, воплощенный в произведенной продукции. При этом в случае эффективного производства ценность продукции больше, чем механическая сумма ценностей всех факторов производства, которые были использованы для изготовления данной продукции. Другими словами, ценность данной продукции содержит в себе сумму ценности всех факторов производства, израсходованных на ее изготовление плюс ценность результата их комбинирования. Это и называется синергетическим эффектом. Между тем в классической и современной экономической литературе говорится о равновесии как естественном состоянии экономических систем. Такая парадигма научного знания могла удовлетворительно объяснить только некоторые параметры стационарных и линейных участков экономического развития. Концепция равновесия требует от

рассматриваемой системы не только линейности, но и закрытости, устойчивости, эквивалентности при операциях обмена, абстрагирования от признания факторов ускорений, придаваемых экономическим процессам наукой и наукоемкими технологиями, составляющими суть нашей эпохи. Реальное экономическое развитие имеет не только стационарные и линейные участки развития, но и экономические циклы, кризисы, депрессии, оживления, катастрофы, т.е. такие состояния, которые не могут быть описаны линейными моделями. В экономических системах имеются флуктуации, связанные с разнообразием товаров на рынке, инновационными процессами, асимметричностью политических, географических, климатических, менталитетных факторов. Флуктуации делают экономические явления процессами упорядочения и разупорядочения, описываемыми с помощью понятия энтропии. Признание за экономическими системами признаков синергизма позволяет распространить на них принципы моделирования, освоенные во второй половине XX века для естественных систем.

Экономические процессы дуалистичны, как и весь объективный мир. Набор волновых процессов в экономических системах по частоте, длине, интенсивности настолько разнообразен, что позволяет говорить о спектральной характеристике экономического развития. Недостаточно объяснения экономических процессов действием экономических циклов жизни машин и технологий или длинных волн Кондратьева. Экономическое развитие – более сложный синергетический процесс. Реальная динамика экономических процессов должна описываться в таких категориях и терминах как когерентность, синхронность, амплитуда, высоко-, средне-, низкочастотные участки спектра, экономический катализ, подобно тому, как в экономической теории получили распространение понятия равновесие, обратимость, необратимость, открытая система, энтропия, стабильность, линейность, нелинейность, катастрофа, бифуркация и т.д. Именно эти понятия лежат в основе новой науки – экономической синергетики.

Экономическая синергетика рассматривает долгосрочное экономическое развитие как системно – синергетический процесс, равноправно включающий эволюцию и революции (катастрофы, бифуркации), стабильность и нестабильность и т.д. Распространение на экономические процессы представлений теории синергетики позволяет высказать несколько принципов, действующих в экономических системах:

1. Условием возникновения новой структуры в экономических системах является диссипация энтропии (изменение упорядоченности системы)

2. Внешние воздействия не могут вызывать более высокой симметрии, чем порожденный ими эффект. Это означает, что в системе «политика- экономика» внешняя среда (политика) не может в долгосрочной перспективе повышать степень упорядоченности экономической системы.

3. Экономическая самоорганизация невозможна в области линейных участков развития.

4. Катастрофы и их следствие – бифуркации (ветвления) – являются естественными состояниями любого развития, в том числе экономического. Они могут быть смоделированы. Катастрофы и ветвления – это не аномальность. Это неизбежность. Это синергетические эффекты в больших и сложных системах.

Положения экономической синергетики применимы к микро- и макропроцессам.

### **Контрольные вопросы**

1. Что означает понятие «самоорганизации»?
2. Поясните относительность понятий «простой» и «сложный».
3. Когда в науке появилась идея самоорганизации?
4. Приведите примеры самоорганизации в природе и в обществе.
5. Наука о самоорганизации развивается по следующим направлениям:
  - синергетика;
  - неравновесная термодинамика;
  - генетика;
  - кибернетика;
  - эволюционная химия;
  - теория катастроф.
6. Примером самоорганизации служит:
  - формирование третичной и четвертичной структуры белка при складывании полипептидной цепи;
  - возникновение периодического режима химической реакции при достаточно высоких концентрациях реагентов;
  - возникновение правильного севооборота при достаточно высоком уровне развития аграрной науки;



- развитие эмбриона в материнском организме у млекопитающих.

7. Что такое открытые и закрытые системы?

8. Какие системы изучает классическая термодинамика?

9. Что означает свойство нелинейности систем?

10. Перечислите основные условия самоорганизации:

- система должна быть открытой;
- система должна быть закрытой;
- наличие флуктуаций;
- отсутствие флуктуаций;
- наличие симметрии;
- нарушение симметрии;
- достаточное количество элементов;
- малое количество элементов системы;
- наличие положительной обратной связи;
- наличие отрицательной обратной связи.

11. Самоорганизация (эволюция) в открытых системах приводит систему в:

- состояние с некоторым порядком;
- состояние максимального беспорядка;
- состояние далекое от термодинамического равновесия;
- состояние термодинамического равновесия.

12. Самоорганизация в системах любого иерархического уровня является выражением действующих в ней:

- детерминистских законов;
- вероятностных законов;
- нелинейных законов;
- законов динамического хаоса;
- законов фрактальности.

13. Что изучает синергетика?

14. Кто является создателем синергетического направления?

15. Какое общее свойство всех самоорганизующихся систем выделил Хакен?

16. Почему работа лазера является примером самоорганизующегося процесса?

17. Проблемой поддержания устойчивости систем путем использования отрицательной обратной связи занимается:

- кибернетика;

- синергетика;
- общая теория систем.

18. Что такое положительная и отрицательная обратная связь?

19. Что такое фрактал? Приведите примеры фрактальности.

20. Сколько выделяют главных направлений прикладного использования синергетики? Перечислите их.

21. Поясните мировоззренческое значение синергетики.

22. Синергетика – наука о:

- динамике систем;
- самоорганизации систем;
- структуре систем.

23. Синергетические процессы происходят только в системах:

- открытых;
- закрытых;
- изолированных;
- термодинамических;
- квантовых.

24. Синергетические процессы происходят, если система находится в состоянии:

- неравновесном;
- равновесном;
- неопределенном.

25. Какие из приведенных ниже характеристик систем наиболее и точно соответствует сущности синергетики:

- нелинейность, эмерджентность, закрытость, стационарность;
- нестабильность, открытость, диссипативность, нелинейность;
- открытость, неравновесность, линейность, катастрофичность;
- стабильность, стационарность, негэнтропийность, закрытость.

26. Какое толкование понятия синергетика является наиболее точным:

- синфазное действие частей системы;
- когерентная организация частей в целое;
- синхронное деление системы на части;
- сотрудничество, совместное действие;
- сосредоточение разделенных частей в целое.

27. Системы, способные создавать упорядоченность из хаоса, называются:

- диссипативными;

- открытыми;
- хаотичными.

28. Процесс приспособления диссипативной системы к внешним условиям носит характер:

- линейный;
- гармонический;
- крайне нелинейный.

29. Выберите основные положения теории самоорганизации систем:

- система должна быть открытой, диссипативной и находиться вдали от равновесия;

- в открытой системе происходит возникновение и усиление беспорядка и эволюция ведет к росту энтропии;

- управление процессами и сохранение динамического равновесия систем основано на принципе отрицательной обратной связи, когда на основе полученных обратных связей система возвращается в исходное состояние;

- система должна обладать любым количеством взаимодействующих между собой элементов.

30. Понятие бифуркация определяется:

- область эволюции и кризисов жизни;
- стационарность состояний;
- ветвление решения в критической точке;
- сцепление частей в целое;
- кривизна пространства – времени.

31. Кем заложены основы неравновесной термодинамики?

32. Что означает диссипация? Флуктуация? Бифуркация?

33. Приведите примеры бифуркаций.

34. Что такое «аттрактор»? Его разновидности.

35. Опишите механизм самоорганизации по Пригожину («порядок через флуктуацию»).

36. Кто и когда впервые наблюдал расширение Вселенной?

37. Что такое «красное смещение»?

38. Какова основная идея теории «горячей» Вселенной?

39. Что такое «реликтовое излучение»? Кем и когда оно было обнаружено?

40. Вывод известного математика прошлого столетия А. Фридмана о развитии Вселенной заключался в том, что:

- Вселенная должна расширяться;
- Вселенная должна сжиматься;
- Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься;
- Вселенная неизменна.

41. Впервые указал возможный путь нуклеосинтеза (процесс нерезонансного захвата нейтрона протоном):

- американский физик Г. Гамов;
- английский ученый А. Пензиас;
- английский астрофизик Ф. Хойл;
- американский астроном Э. Хаббл.

42. Барьер на пути нуклеосинтеза связан с «магическими числами»:

- три и шесть;
- пять и восемь;
- три и семь.

43. Вселенная стала прозрачной:

- когда прекратилось взаимодействие электронов с фотонами и барионным веществом, а далее возникло реликтовое излучение;
- когда радиус Вселенной достиг 100 млн. парсек, плотность вещества снизилась до  $10^{-9}$  кг/м<sup>3</sup>, температура 10000К;
- когда электроны соединились с ядрами.

44. Реликтовое излучение обнаружил:

- Э. Хаббл;
- А. Пензиас и Р. Вильсон;
- Г. Гамов.

45. Гипотеза звездного нуклеосинтеза, предложенная Ф. Хойлом, была экспериментально подтверждена в опытах:

- У. Фаулера;
- И. Бальмера;
- Г. Мозли.

46. Основная идея инфляционной теории состоит в том, что:

- расширение Вселенной и ее эволюция рассматриваются из состояния – «физический вакуум»;
- в результате инфляции Вселенная разогрелась до «Большого взрыва» и далее через точки бифуркации в реальный мир эволюционировали реальные частицы материи.

47. Почему экономические системы можно считать синергетическими?

48. Что такое экономическая синергетика?

## ТЕСТ

1. В современной физической картине мира законы и закономерности носят характер:

1. Вероятностный;
2. Детерминистский;
3. Однозначный.

2. Что представляет собой энергия согласно современным представлениям?

1. Общую количественную меру различных форм движения материи;
2. Произведение массы тела на половину квадрата его скорости;
3. Результат работы энергетических установок;
4. Произведение массы тела на его скорость.

3. К динамическим теориям относятся:(3)

1. Молекулярно-кинетическая теория газов;
2. Термодинамика;
3. Динамика Ньютона;
4. Теория поля Максвелла;
5. Квантовая механика.

4. К статистическим теориям относятся:(2)

1. Молекулярно-кинетическая теория газов;
2. Термодинамика;
3. Динамика Ньютона;
4. Теория поля Максвелла;
5. Квантовая механика.

5. Перечислите виды механической энергии:(2)

1. тепловая;
2. потенциальная;
3. энергия падающей воды;
4. кинетическая;
5. энергия ветра.

6. Современная физическая картина мира (СФКМ) или квантово-полевая картина мира формируется на основе(3):

1. квантовой гипотезы М.Планка;
2. волновой механики Шредингера;
3. теории относительности Эйнштейна;
4. электронной теории Лоренца.

7. Принцип квантования предложил:

1. Рентген;
2. Герц;
3. Беккерель;
4. Максвелл;
5. Фарадей;
6. Дж.Томсон;
7. Э.Резерфорд;
8. Н.Бор;
8. П.Н. Лебедев;
9. А.Г.Столетов;
10. М. Планк.

8. Невозможность создания вечного двигателя первого рода обосновывается:

1. Третьим законом Ньютона;
2. Специальной теорией относительности;
3. Законом сохранения энергии;
4. Наличием трения в энергетических установках.

9. Внутренней энергией термодинамической системы называется:

1. Сумма энергий теплового движения и взаимодействия частиц системы;

2. Энергия изолированного тела;
3. Энергия находящаяся внутри тепловой машины;
4. Энергия, величину которой нельзя измерить.

10. Статистическое описание макросистем базируется на:

1. Атомно-корпускулярной теории строения вещества;
2. Измерениях температуры, давления и объема;
3. Законах квантовой механики;
4. Общей теории статистики.

11. Физической основой лазерной техники является:

1. Фотоэффект;
2. Общая теория относительности;
3. Эффект вынужденного излучения;
4. Законы Ньютона.

12. К нетрадиционным видам энергетики относят:

1. Гелиоэнергетику;
2. Теплоэнергетику;
3. Гидроэнергетику;
4. Разработку аккумуляторов большой емкости.

13. Сколько начал лежит в основе термодинамики?

1. Три;
2. Два и молекулярно-кинетическая теория;
3. Четыре;
4. Одно и молекулярно-кинетическая теория.

14. Выберите трактовку первого начала термодинамики:

1. Какие бы изменения не происходили в реальных изолированных системах, они всегда ведут к увеличению энтропии;
2. С приближением абсолютной температуры к нулю энтропия тоже стремится к нулю ("тепловая теорема Нернста");
3. Количество теплоты, сообщенное телу, идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение работы;
4. Если два тела с различными температурами приведены в тепловой контакт, то тепло переходит от более горячего к более холодному телу.

15. Назовите особенность тепловой энергии:

1. Это энергии неупорядоченного, хаотического движения мельчайших частиц;
2. Это энергия связанная с упорядоченным движением частиц из области высокой температуры в область низкой температуры.

16. Два одинаковых стальных шарика упали с одной и той же высоты. Первый упал в вязкий грунт, а второй, ударившись о камень, отскочил и был пойман рукой на некоторой высоте. Который из шариков больше нагрелся?



1. первый;

2. второй.

17. Что обладает большой внутренней энергией: рабочая смесь, находящаяся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания к концу такта сгорания (до проскакивания искры), или продукт ее сгорания к концу рабочего хода?

1. рабочая смесь;

2. продукты сгорания.

18. Проявлением асимметрии природы является:

1. Передача энергии от холодного к нагретому телу при совершении работы;

2. Передача энергии от нагретого к холодному телу.

19. Невозможность создания вечного двигателя второго рода обосновывается:

1. Третьим началом термодинамики;

2. Законом сохранения энергии;

3. Законами динамики;

4. Вторым началом термодинамики.

20. Выберите правильную формулировку второго начала термодинамики:

1. Невозможно совершить работу за счет энергии тел, находящихся в - термодинамическом равновесии;

2. Энергия сохраняется;

3. Невозможно охладить вещество до температур абсолютного нуля посредством конечного числа шагов.

21. Достоинством и недостатком термодинамического метода, одновременно, является:

1. Независимость от принятого взгляда на строение вещества;

2. Независимость от принятых значений давления, объема и температуры;

3. Существенное различие явлений по своей природе, между которыми она устанавливает связь.

22. Какие виды энергии существуют?(3)

1. Аннигиляционная энергия;
2. Гравитационная энергия;
3. Магнитострикционная энергия;
4. Теплородная энергия;
5. Вакуумная энергия;
6. Апейронная энергия.

23. Толчком для развития учения о тепловых явлениях явилось:

1. Изобретение термометра;
2. Изобретение тепловой машины;
3. Изобретение тепловоза;
4. Открытие теплового расширения тел.

24. Ф. Бекон, И. Ньютон, Р. Декарт, М. Ломоносов придерживались:

1. Теплородной теории теплоты;
2. Корпускулярной теории теплоты;
3. Потенциальной теории теплоты;
4. Вещественной теории теплоты.

25. В истории естествознания существовали следующие теории теплоты:(3)

1. Вещественная теория;
2. Молекулярная теория;
3. Теплородная теория;
4. Потенциальная теория;
5. Корпускулярная теория.

26. Опыты к середине 19 столетия показали, что:(3)

1. Тепловой жидкости не существует;
2. Тепловая энергия в паровых машинах сохраняется;
3. При совершении работы паровыми машинами теплота исчезает;
4. Количество теплорода конечно;
5. Источник тепла не исчерпаем.

27. Значительный вклад в развитие теории теплоты внесли:(3)

1. Р.Клаузиус;
2. И.Ньютон;
3. Д.Максвелл;

4. Л.Больцман;
5. М.Ломоносов.

28. В середине 18 века победу одержала (2):

1. теория теплорода;
2. кинетическая теория теплоты;
3. вещественная теория теплоты.

29. Термодинамика - это наука о тепловых явлениях, в которой:

1. Не учитывается строение вещества;
2. Свойства макроскопической системы определяются свойствами частиц системы, особенностями их движения и усредненными значениями кинетических и динамических характеристик этих частиц.

30. Суть детерминизма состоит в том, что все существующее в мире происходит:

1. хаотично;
2. периодически;
3. закономерно.

31. Индетерминизм – учение отрицающее (2):

1. объективную причинную обусловленность;
2. вероятностный характер явлений;
3. неопределенность состояний;
4. всеобщую закономерность явлений.

32. Статистические законы более характерны для:

1. микромира;
2. макромира;
3. мегамира.

33. Характер предсказаний, полученных на основе динамических законов, носит характер:

1. достоверный;
2. неопределенный;
3. вероятностный.

34. Перечислите принципы, на которых построена динамическая теория(3):

1. Состояние объекта определяется значением величины;
2. Состояние объекта определяется вероятностными распределениями;
3. оценки однозначны;
4. оценки неоднозначны;
5. классическая механика;
6. квантовая механика.

35. Перечислите принципы, на которых построены статистические теории(3):

1. Состояние объекта определяется значением величины;
2. Состояние объекта определяется вероятностными распределениями;
3. оценки определены;
4. оценки неопределены;
5. оценки однозначны;
6. оценки неоднозначны;
7. классическая механика;
8. квантовая механика.

36. Состояние системы в термодинамике определяется: (3)

1. давлением;
2. температурой;
3. объемом;
4. координатами элементов системы;
5. скоростями элементов системы.

37. Первый постулат Бора утверждает, что в каждом атоме:

1. Имеются электроны и протоны;
2. Существуют стационарные состояния, в которых он не излучает энергии;
3. Возможно поглощение и испускание энергии;
4. Выделяется атомная энергия;

38. Сущность процесса измерения заключается:

1. В сравнении измеряемой физической величины с эталоном данной величины;

2. В использовании современных средств и методов измерения;
3. В сведении любого измерения к измерению длины;
4. В исключении любых ошибок измерения.

39. Статистической теорией является: (2)

1. квантовая механика;
2. классическая электродинамика;
3. эволюционная теория Дарвина;
4. классическая механика.

40. Статистическими теориями являются (2):

1. общая теория относительности;
2. кинетическая теория газов;
3. квантовая механика;
4. классическая электродинамика.

41. Статистические научные теории (2):

1. позволяют рассчитывать и предсказывать лишь вероятность того или иного значения величин, характеризующих систему;
2. описывают состояние системы на языке вероятности, с которой та или иная величина, характеризующая систему, принимает заданное значение;
3. описывают состояние системы значениям измеримых величин, характеризующих эту систему;
4. позволяют однозначно предсказывать будущие значения физических величин, характеризующих систему, по их начальным значениям.

42. Преобразование лапласовского детерминизма в вероятностный подход:

1. Обусловлено усложнением предмета исследования в связи с изучением глубинной структуры материи и увеличением числа участвующих элементов;
2. Обусловлено необходимостью увеличения точности расчета;
3. обусловлено недостаточностью информации.

43. В современной физической картине мира (СФКМ) законы и закономерности носят характер:

1. вероятностный;
2. детерминистский;
3. однозначный.

## ГЛАВА 3. ЗАДАЧИ

### 3.1. Общие сведения

Идеальные газы подчиняются уравнению состояния Менделеева – Клайперона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где  $P$  – давление газа;  $V$  – его объем;  $m$  – масса газа;  $\mu$  – молярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная. Идеальный газ может участвовать в процессах, когда из термодинамических параметров неизменен: изохорный, изотермический или изобарный процессы. В этом случае можно применять частные случаи уравнения Менделеева – Клайперона, а именно, законы Гей-Люссака, Бойля – Мариотта.

Основное уравнение кинетической теории газов имеет вид:

$$P = 2/3 n \hat{W}_0 = 2/3 n m_0 v^2/2,$$

где  $n$  – число молекул в единице объема;  $\hat{W}_0$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы;  $m_0$  – масса молекулы;  $v$  – средняя скорость.

Число молекул в единице объема  $n = P / (k \cdot T)$ ,

где  $k = R / N_A$  – постоянная Больцмана;  $N_A$  – число Авогадро.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул

$$\hat{W}_0 = 3/2 k T.$$

Для средней квадратичной скорости справедливо выражение:  $v^2 = 3 R T / \mu = 3 k T / m_0$ ,

где  $m_0 = \mu / N_A$ .

Энергия теплового движения молекул или внутренняя энергия газа определяется соотношением:  $W = m \cdot i \cdot R \cdot T / (2 \cdot \mu)$ , где  $i$  – число степеней свободы молекул (для одноатомного газа  $i$  равно 3, для двухатомного –  $i = 5$ , многоатомного –  $i = 6$ ).

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме  $C_V = i \cdot R / 2$ , при постоянном давлении  $C_P = C_V + R$ .

Первое начало термодинамики записывается в виде:  $dQ = dW + dA$  и означает, что количество теплоты, сообщаемое термодинамической системе, идет на изменение внутренней энергии системы и совершение работы. Причем работа, совершаемая при изменении объема, определяется выражением  $dA = P \cdot dV$ , а изменение внутренней энергии –

$$dW = m i R dT / (2 \mu).$$

При сгорании топлива массой  $m$  выделяется количество теплоты  $Q = q \cdot m$ ,

где  $q$  – удельная теплота сгорания топлива.

Коэффициент полезного действия (кпд) равен:

$$\eta = Q_{\text{полезное}} / Q_{\text{затраченное}} = (T1 - T2) / T1.$$

### 3.2. Примеры решения задач

**Задача 5.2.1.** Найдите среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы гелия, имеющего при давлении 100 кПа плотность  $0.12 \text{ кг / м}^3$ .

**Решение:** Воспользуемся основным уравнением кинетической теории газов  $P = 2 / 3 n \hat{W}_0$ . Число молекул в единице объема  $n = N_A \rho / \mu$ , где  $\rho$  – плотность. Выразим из этих двух формул среднюю кинетическую энергию:  $\hat{W}_0 = 3 P \mu / (2 \rho N_A)$ . Подставляем числовые значения и получим  $\hat{W}_0 = 8.3 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ .

**Задача 5.2.2.** Найдите удельную теплоемкость при постоянном объеме некоторого многоатомного газа, если известно, что плотность этого газа при нормальных условиях равна  $7.95 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ .

**Решение:** Удельная теплоемкость при постоянном объеме определяется формулой:  $C_V = (R \cdot i) / (2 \cdot \mu)$ . Из уравнения Клайперона - Менделеева следует выражение для плотности газа:  $\rho = (P \cdot \mu) / (R \cdot T)$ . Из этих двух уравнений находим  $C_V = (P \cdot i) / (2 \cdot T \cdot \rho)$ . Подставляем числовые значения и получим  $C_V = 1400 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)}$ .

**Задача 5.2.3.** Тело массой 100 кг скользит вниз по плоскости, наклоненной под углом  $30^\circ$  к горизонту. Как изменится внутренняя энергия тела и наклонной плоскости при перемещении тела на 3 м по высоте? Коэффициент трения скольжения равен 0.2.

**Решение:** При скольжении тело и плоскость нагреваются, в результате чего их внутренняя энергия увеличивается. Изменение внутренней энергии равно работе против сил трения, т.е.  $\Delta W = A_{\text{тр}}$ . Сила трения  $F_{\text{тр}} = k \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha$ . Путь, пройденный при опускании на высоту, определяется формулой:  $l = h / \sin\alpha$ . Следовательно, работа выражается



формулой:  $A_{mp} = F_{mp} \cdot l = k \cdot m \cdot g \cdot h \cdot ctg\alpha$ . Подставляем числовые значения и получим  $\Delta W = 1020 \text{ Дж}$ .

**Задача 5.2.4.** Автомобиль расходует 5.67 кг бензина на 50 км пути. Определите мощность, развиваемую при этом двигателем автомобиля, если скорость движения 72 км/час и КПД двигателя 22%. Удельную теплоту сгорания бензина принять равной 45 МДж/кг.

**Решение:** Выделяемое количество теплоты при сгорании бензина равно энергии  $W = m \cdot q$ . Полезная работа при этом  $A = \eta \cdot W$ . Развиваемая двигателем мощность  $N = A / t = m \cdot q \cdot \eta / t$ . Учитывая, что  $t = S / v$ , получим  $N = m \cdot q \cdot \eta \cdot v / S$ . Подставляем числовые значения и получим  $N = 22.4 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ .

**Задача 5.2.5.** В результате теплового процесса газ совершил работу 2 кДж и передал холодильнику 8.4 кДж тепла. Определите КПД тепловой машины.

**Решение:** Совершаемая рабочим телом полезная работа  $A = Q_1 - Q_2$ , т.е. количество теплоты, переданное рабочему телу  $Q_1 = A + Q_2$ , где  $Q_2$  – количество теплоты, отданное холодильнику. КПД тепловой машины:

$\eta = Q_{\text{полезное}} / Q_{\text{затраченное}} = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = A / (A + Q_2)$ . Подставляем числовые значения и получим  $\eta = 19\%$ .

### 3.3. Задачи для самостоятельного решения

1. Бак с жидкостью, над поверхностью которой находится воздух, герметически закрыт. Почему, если открыть кран, находящийся в нижней части бака, после вытекания некоторого количества жидкости дальнейшее ее истечение прекратится? Что надо сделать, чтобы обеспечить свободное вытекание жидкости?

2. Во сколько раз изменится давление воздуха в цилиндре, если поршень переместится на 1/3 его хода влево? Вправо?

3. Баллон содержит 40 л сжатого воздуха под давлением 15 МПа. Какой объем воды можно вытеснить из цистерны подводной лодки воздухом из этого баллона, если лодка находится на глубине 20 м?

4. Какова плотность сжатого воздуха при  $0^\circ\text{C}$  в камере автомобиля «Волга», если он находится под давлением 0,17 МПа (избыточным над атмосферным)?

5. Какая масса воздуха  $m$  выйдет из комнаты объемом  $V = 60 \text{ м}^3$  при повышении температуры от  $T_1 = 280 \text{ К}$  до  $T_2 = 300 \text{ К}$  при нормальном давлении?
6. Почему аэростаты окрашивают в серебристый цвет?
7. Резиновую лодку надули ранним утром, когда температура окружающего воздуха была  $7^\circ\text{С}$ . На сколько процентов увеличилось давление воздуха в лодке, если днем под лучами солнца от прогрелся до  $35^\circ\text{С}$ ?
8. При какой температуре находился газ в закрытом сосуде, если при нагревании его на  $140 \text{ К}$  давление возросло в 1,5 раза?
9. Какова зависимость числа молекул газа в единице объема от абсолютной температуры при изохорном процессе? При изобарном процессе?
10. Газ при давлении  $0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $15^\circ\text{С}$  имеет объем  $5 \text{ л}$ ? Чему равен объем этой массы газа при нормальных условиях?
11. Какое давление рабочей смеси установилось в цилиндрах внутреннего сгорания, если к концу такта сжатия температура повысилась с  $47$  до  $367^\circ\text{С}$ , а объем уменьшился с  $108$  до  $0,3 \text{ л}$ ? Первоначальное давление было  $100 \text{ кПа}$ .
12. Каково давление сжатого воздуха, находящегося в баллоне емкостью  $20 \text{ л}$  при  $12^\circ\text{С}$ , если масса этого воздуха  $2 \text{ кг}$ ?
13. Какой емкости нужен баллон для содержания в нем  $50$  моль газа, если при максимальной температуре  $360 \text{ К}$  давление не должно превышать  $6 \text{ МПа}$ ?
14. В одинаковых баллонах при одинаковой температуре находятся равные массы водорода ( $\text{H}_2$ ) и углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Какой из газов и во сколько раз производит большее давление на стенки баллона?
15. Пользуясь таблицей Менделеева, найти плотность ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) при нормальных условиях.
16. Зная плотность воздуха при нормальных условиях, найти молярную массу воздуха.
17. Вычислить увеличение внутренней энергии  $2 \text{ кг}$  водорода при повышении его температуры на  $10 \text{ К}$ .
18. Для получения газированной воды через воду пропускают сжатый углекислый газ. Почему температура воды при этом понижается?
19. Вычислить КПД газовой горелки, если в ней используется газ. Теплота сгорания которого  $36 \text{ МДж/м}^3$ , а на нагревание чайника с  $3 \text{ л}$

воды от  $10^{\circ}\text{C}$  до кипения было израсходовано 60 л газа. Теплоемкость чайника 100 Дж/К.

20. При трении двух тел, теплоемкости которых по 800 Дж/К, температуре через 1 мин повысилась на 30 К. Найти среднюю мощность при трении.

21. Два одинаковых стальных шарика упали с одной и той же высота. Первый упал в вязкий грунт, а второй, ударившись о камень, отскочил и был пойман рукой на некоторой высоте. Который из шариков больше нагрелся?

22. Что обладает большей внутренней энергией: рабочая смесь, находящаяся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания к концу такта сжатия (до проскакивания искры), или продукт ее горения к концу рабочего хода?

23. Гусеничный трактор развивает номинальную мощность 60 кВт и при этой мощности расходует в среднем в час 18 кг дизельного топлива. Найти КПД его двигателя.

## ВЫВОДЫ

1. Термодинамика – наука о тепловых явлениях, в которой не учитывается молекулярное строение тел и тепловые явления характеризуются параметрами, регистрируемыми приборами, не реагирующими на воздействие отдельных молекул.

2. Нулевое начало термодинамики - температура – это просто уточнение и количественное выражение понятия «степени нагретости».

3. Первое начало термодинамики - количество теплоты  $\Delta Q$ , сообщенное телу, идет на увеличение его внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение работы  $\Delta A$ .

4. Второе начало термодинамики - невозможно совершить работу за счет энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии.

5. Третье начало термодинамики касается свойств веществ при очень низких температурах. Оно утверждает невозможность охлаждения вещества до температуры абсолютного нуля посредством конечного числа шагов. Следовательно, абсолютный нуль недостижим.

6. Синергетика – наука о самоорганизации сложных систем, превращении хаоса в порядок. Она претендует на открытие универсальных механизмов самоорганизации как в живой так и в неживой природе. Теоретической основой синергетики выступает неравновесная термодинамика.

7. В отличие от кибернетики, синергетика исследует механизмы возникновения новых структур за счет разрушения старых, а не процессы стабилизации. Синергетические системы функционируют в соответствии с принципом положительной обратной связи.

8. Главные свойства самоорганизующихся систем – открытость, неустойчивость (существенная неравновесность) и нелинейность.

9. Синергетика предполагает следующее объяснение механизма возникновения порядка из хаоса. За счет взаимодействия с окружающей средой в какой-то момент поведение системы становится неоднозначным. Та точка, в которой проявляется неоднозначность процессов, называется точкой бифуркации (разветвления). В этой точке ничтожно малое воздействие (флуктуация) приводит к значительным и даже непредсказуемым последствиям. При этом возникают эффекты согласования, когда элементы системы, бывшие до этого независимыми, начинают действовать в унисон. Такое согласованное поведение

синергетика называет когерентным. Направление развития системы после прохождения точки бифуркации оказывается непредсказуемым. Таким образом, ключевую роль в процессах самоорганизации играют случайные факторы. Представление об объективности случайных факторов становится фундаментальным принципом современной науки.

10. Синергетический подход позволяет ответить на вопрос: почему вопреки действию закона энтропии мир демонстрирует высокую степень организованности и порядка? Хаос более не рассматривается как разрушительное состояние. Хаос созидателен, поскольку развитие систем осуществляется через хаотичность и неустойчивость.

11. Синергетический взгляд на мир меняет наше представление о случайности и необходимости, необратимости материальных процессов, позволяет иначе понять характер и сущность энтропийных процессов.

12. В настоящее время синергетический подход получил признание не только в естествознании, но и в гуманитарных и социальных науках. Более того, синергетика постепенно преодолевает границы междисциплинарных научных исследований, превращаясь в новую мировоззренческую парадигму.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Концепции современного естествознания: Учебник / В.М. Найдыш. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2007. - 704 с.: ил.; 60x90 1/16. (переплет) ISBN 978-5-98281-102-8, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=123452>.
2. Концепции современного естествознания: Практикум / В.П. Романов - 3-е изд., испр. и доп. - М.: Вузовский учебник, 2008. - 128 с.: 60x88 1/16. (обложка) ISBN 978-5-9558-0062-2, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=133587>.
3. Концепции современного естествознания: Учебное пособие для студентов вузов / В.П. Бондарев. - М.: Альфа-М, 2009. - 464 с.: ил.; 60x90 1/16. (переплет) ISBN 978-5-98281-002-1, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=185797>.
4. Концепции современного естествознания: Учебное пособие / Н.П. Ващекин, А.Н. Ващекин; Российская академия правосудия. - М.: ИЦ РИОР и др., 2010. - 253 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование). (переплет) ISBN 978-5-369-00590-3, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=193697>.
5. Концепции современного естествознания: Учебник / Г.И. Рузавин. - 3-е изд., стер. - М.: ИНФРА-М, 2012. - 271 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование). (переплет) ISBN 978-5-16-004924-3, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=232296>.
6. Концепции современного естествознания.: Учебное пособие для студентов вузов / В.П. Романов. - 4-е изд., испр. и доп. - М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2011. - 286 с.: 60x90 1/16. (переплет) ISBN 978-5-9558-0189-6, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=256937>.
7. Концепции современного естествознания: социогуманитарная интерпретация специфики современной науки: Учебное пособие / Т.Г. Лешкевич. - М: НИЦ Инфра-М, 2013. - 335 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат). (переплет), <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=342109>.
8. Концепции современного естествознания: Учебник / Г.И. Рузавин. - 3-е изд., стер. - М.: НИЦ Инфра-М, 2013. - 271 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат). (переплет) ISBN 978-5-16-004924-3, <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=390453>.
9. Боголюбов А.Н. Электронная библиотека по физике. Справочник. 2010, [fizika-class.narod.ru/ks.htm](http://fizika-class.narod.ru/ks.htm)

10. Гусейханов М.К. Эволюция Вселенной, жизни и цивилизации. Электронная библиотека, 2010, [nashol.com/.../kosmos-evoluciya-vselennoi-jizni-i-civilizacii-karl-sagan.html](http://nashol.com/.../kosmos-evoluciya-vselennoi-jizni-i-civilizacii-karl-sagan.html).