Лекция 9

II. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
(продолжение – 2)

САМООРГАНИЗАЦИЯ И НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Концепция необратимости. В классической и квантовой механике **время** является мерой длительности всех механических процессов и выступает в качестве внешнего параметра, знак которого в уравнениях движения можно менять на обратный. Действительно, если заданы начальное состояние системы, т.е. начальные ее координаты и импульсы, и известны уравнения движения, то в механике можно вполне ***однозначно*** определить любое ее состояние, как ***в будущем***, так и ***в прошлом***. Следовательно, ***направление времени*** никак не учитывается в классической и квантовой механике, хотя в квантовой механике предсказания имеют лишь ***вероятностный характер.*** Такое представление о времени противоречит как повседневной нашей практике, так и тем теоретическим воззрениям, которые установились в естественных науках, изучающих ***конкретные изменения*** явлений во времени (биология, геология, история, палеонтология и др.). Если классическая физика изучала обратимые процессы, то биологические, социальные и гуманитарные науки ясно показывали, что предметом их исследования служат процессы ***необратимые***, ***изменяющиеся во времени и имеющие свою историю и развитие.*** Таким образом, ***необратимость*** не входила в фундаментальные законы неживой природы.

Классическая термодинамика впервые ввела в физику ***понятие времени*** в весьма своеобразной форме, а именно ***необратимого процесса возрастания энтропии в системе.*** Чем выше ***энтропия*** системы, тем больший временной промежуток прошла система в своей ***эволюции***.

Такое понятие о времени и, особенно, об ***эволюции системы*** коренным образом отличалось от понятия ***эволюции***, которое лежало в основе теории Дарвина. В то время как в дарвиновской теории происхождения новых видов растений и животных путем естественного отбора эволюция направлена на выживание более совершенных организмов и усложнение их ***организации,*** в классической термодинамике эволюция связывалась с ***дезорганизацией систем.*** Это противоречие оставалось неразрешимым вплоть до 60-х гг. XX в., пока не появилась новая, ***неравновесная термодинамика***, которая опирается на концепцию ***неравновесных процессов.***

Открытые системы. ***<u>Открытыми</u> называются системы, способные обмениваться с окружающей средой веществом, энергией и информацией.***

В отличие от ***закрытых***, или изолированных, ***открытые*** системы обмениваются с окружающей средой энергией, веществом и информацией. **Все** реальные системы являются ***открытыми.*** В неорганической природе они

обмениваются с внешней средой, которая также состоит из различных систем, обладающих энергией и веществом. В социальных и гуманитарных системах к этому добавляется обмен информацией. ***Информационный обмен*** осуществляется также в биологических системах, в частности при передаче генетической информации.

В ***открытых системах*** также производится ***энтропия***, поскольку в них происходят ***необратимые процессы***, то энтропия в этих системах не накапливается, как в закрытых системах, а выводится в окружающую среду. Поскольку ***энтропия характеризует степень беспорядка в системе***, постольку можно сказать, что ***открытые системы живут за счет заимствования порядка из внешней среды.***

Отметим взаимное влияние друг на друга одновременно происходящих ***необратимых процессов***. Существует **принцип симметрии Кюри,** который в формулировке **Вейля** гласит: “Если условия, однозначно определяющие какой-либо эффект, обладают некоторой симметрией, то результат их действия не нарушит эту симметрию”. Поэтому формально **все** неравновесные процессы разделяются на ***скалярные*** (химические реакции), ***векторные*** (теплопроводность, диффузия) и ***тензорные*** (вязкое трение). В соответствии с принципом симметрии величины разных размерностей не могут быть связаны друг с другом. Так, скалярная величина (химическое сродство) не может вызвать векторный поток (теплопроводность).

На пути любой достаточно сложной системы к равновесию, которое характеризуется максимумом энтропии, встречаются обстоятельства, не позволяющие это сделать. В качестве таковых выступают ***граничные условия***, которые могут быть постоянными или меняться. Если они постоянны, например, поддерживают определенную разность температур на границах, то переменные состояния стремятся асимптотически к независимым от времени величинам, достигая квазистационарного или стационарного состояния. ***Стационарные состояния*** в открытых системах австрийский (впоследствии канадский) биолог-теоретик Людвиг фон **Берталанфи** (1901–1972) назвал ***текущим равновесием.*** Ему принадлежит и термин ***открытая система.*** Берталанфи построил теорию биологических организмов на базе обобщения физической химии, кинетики и термодинамики, которая стала называться ***“теорией открытых систем”***. Он ввел формальное выражение таких важных свойств ***системных параметров***, как сумма, целостность, организация, рост, конкуренция и т.д., широко применяя аппарат дифференциальных уравнений. Понятие ***локального***, или ***текущего, равновесия*** Берталанфи ввел для живого организма – как неравновесной открытой системы. Состояние ***текущего равновесия*** в системе должно поддерживаться ***извне*** обменом веществом, энергией и информацией, компенсирующим потери на диссипацию. Такие состояния, близкие к равновесным, встречаются в различных областях естествознания.

К **самоорганизации** способны только ***открытые системы***, находящиеся в состоянии, далеком от термодинамического равновесия (существенно неравновесные). Под ***самоорганизацией*** понимается спонтанные переход

открытой системы от менее сложных и менее упорядоченных форм организации к более сложным и упорядоченным.

Процессы самоорганизации описываются ***нелинейными уравнениями*** для макроскопических функций. Оказалось, что под действием *крупномасштабных флуктуаций* возникают ***коллективные формы движения***, называемые ***модами***, между которыми возникает конкуренция, происходит отбор наиболее устойчивых из них, что и приводит к спонтанному возникновению макроскопических структур. Брюссельская школа, возглавляемая И.Р. Пригожиным, исследовала способность открытых систем к самоорганизации и выделила ***неравновесность в качестве основного источника упорядоченности***!

В открытых системах можно менять потоки энергии и вещества и тем самым регулировать образование диссипативных структур. При неравновесных процессах, начиная с какого-то критического для данной системы значения внешнего потока, из неупорядоченных и хаотических состояний за счет потери их устойчивости могут возникнуть ***упорядоченные состояния.*** Упорядоченность может быть ***временная, пространственная и пространственно-временная.***

В живой и неживой имеется огромное множество открытых систем, которые обладают ***высокой степенью упорядоченности***. Например, различные машины и живые организмы значительно более упорядочены, чем вещества и субстанции, из которых они построены. Они представляют собой более организованную форму существования материи, чем окружающая их среда. Если эти реальные состояния рассматривать с позиций классической термодинамики, то намечается очередной парадокс: ***организованная система должна обладать меньшей энтропией по сравнению с окружающей средой*** (Больцман утверждал, что энтропия в целом в мире возрастает). В чем тут дело?

Необходимо еще раз отметить качественное отличие замкнутой системы от открытой. В замкнутой системе может сохраняться и неравновесная ситуация, но до тех пор, пока система за счет внутренних процессов не придет в равновесие и энтропия достигнет максимума. Для открытых же систем за счет подпитки энергии от внешней среды могут возникать диссипативные структуры с меньшей энтропией, т.е. система, ***самоорганизуясь в новом стационарном состоянии***, уменьшает свою энтропию, «***сбрасывает***» избыток ее, возрастающий за счет внутренних процессов, в окружающую среду. Открытая система как бы «питается» отрицательной энтропией (***негэнтропией***, как ее иногда называют). Возникают новые устойчивые неравновесные состояния, но близкие к равновесию, когда диссипация энергии имеет минимум и рост энтропии оказывается меньше, чем в других близких состояниях. При определенных условиях суммарное уменьшение энтропии за счет отмена потоками с внешней средой может превысить ее внутреннее производство.

Роль энтропии, негэнтропия и информация. ***Энтропия*** связана с вероятностями: $\mathbf{S = k \ln W}$. Здесь **W** выражает число микросостояний, определяемое квантовыми законами, т.е. **энтропия** – ***«количественная мера***

беспорядка» в макроскопических системах – определяется числом микроскопических состояний, соответствующих данному макроскопическому. Формула **Больцмана**, приведенная выше, связывает энтропию с хаосом. Слева стоит ключевое понятие второго начала термодинамики, характеризующее любые самопроизвольные изменения системы, а справа – величина, связанная с хаосом и служащая мерой рассеяния энергии, ее деградации во Вселенной.

Второе начало термодинамики определяет важную тенденцию в эволюции физического мира – ***с течением времени в замкнутой изолированной системе энтропия должна возрастать.*** В результате энергии распределяются по рангам так, что высший занимают те, которые способны превратиться в большее число видов энергии. Тогда низший ранг достанется теплоте, превращения которой ограничены принципом **Карно**. Из энергий, встречающихся в физике и химии, высший ранг имеют механическая и электрическая энергии, промежуточный – химическая энергия (из-за тепловых явлений, сопровождающих химические реакции). Психологически удобно, поскольку наш ум привык негативно воспринимать потерю чего-либо, пользоваться величиной, равной энтропии, но с обратным знаком, которую предложил ввести **Шредингер**. Один из творцов теории информации французский физик Леон **Бриллюэн** (1889–1969) назвал ее **негэнтропией**:
N = – S. ***Негэнтропия*** представляет качество энергии, а принцип Карно выражает закон обесценивания энергии, ее деградации. Система, способная производить механическую работу (сжатая пружина, заряженная батарея, поднятый над Землей груз) может рассматриваться как источник негэнтропии, и, совершая работу, она теряет ее запас.

Негэнтропия и информация. Винер, один из создателей кибернетики не дал определения информации, но отметил: “это не материя, и не энергия”, это просто “информация”. В 40-х годах XX в. количество информации, стали понимать как меру упорядоченности структур в противовес мере хаоса – энтропии. Постепенно информация превратилась в ***меру выбора*** из множества возможных вариантов. В последнее время вместо представления о мире как о двуединой сущности (***материя–дух***) все чаще стали говорить о триединстве (***материя–дух–информация***). Информация стала рассматриваться в качестве философской категории. Такое отношение к информации связано с тем, что ***информационный подход*** оказался удобен при изучении эволюционных процессов, и ***информация стала мерой изменения состояния системы при усложнении и развитии.***

Чем выше неопределенность в знании **W,** тем больше число возможных микросостояний для данного макросостояния, тем больше вероятность и больше энтропия. Получение каких-либо дополнительных сведений о системе позволяет точнее охарактеризовать ее структуру, сократить число элементарных состояний, уменьшить вероятность и энтропию. Поэтому любая дополнительная информация увеличивает ***негэнтропию*** системы. Поскольку система самопроизвольно переходит в состояние с меньшей негэнтропией (более устойчивое, с возрастающей энтропией), то убывает ценность

добавочной информации. Информация эквивалентна отрицательной энтропии, или негэнтропии. В случае открытых систем можно вмешаться в естественный ход процессов, имея некоторые сведения о системе, и преобразовать информацию в постоянную негэнтропию, и наоборот, негэнтропию – в информацию.

Информация призвана компенсировать рост энтропии, поэтому ею можно дополнить закон неограниченного роста энтропии, как того требует принцип Карно, и превратить второе начало термодинамики в ***закон сохранения энтропии и информации.*** Информационный подход позволяет единым образом описать и неживую, и живую природу.

Принцип производства минимума энтропии. Более корректно понимание процессов в открытых системах системах нашло отражение в ***принципе производства минимума энтропии*** Пригожина – Гленсдорфаа. Под производством энтропии понимают отношение изменения энтропии dS к единице объема системы. Степень упорядоченности открытой системы можно определить по этому принципу производством энтропии. Общее изменение энтропии

$$dS = dS_{i\,(\text{внутреннее})} + dS_{e\,(\text{внешнее})},$$

где dS полное изменение энтропии в открытой системе, dS_i - изменение энтропии за счет за счет внутренних процессов (оно может быть только положительным, т.е. увеличением, поскольку согласно второму закону термодинамики внутри системы идут лишь необратимые процессы с ростом энтропии, dS_e - изменение энтропия за счет взаимодействия с окружающей средой. Это изменение связано с обратимыми процессами, поэтому оно может быть как положительным, так и отрицательным.

И.Р. **Пригожин** сформулировал расширенный вариант второго начала термодинамики. ***В открытой системе изменение энтропии будет обусловлено не только процессами внутри системы, в которых энтропия не может убывать (второе начало термодинамики), но и процессами обмена энергией и веществом с окружающей средой, в которых энтропия может, как убывать, так и возрастать.***

В закрытой системе $dS_e = 0$, а $dS_i > 0$ и тогда в целом $dS > 0$. В открытой системе $dS = 0$ или даже $dS < 0$, поскольку dS_e может компенсировать энтропию dS_i, произведенную внутри системы, или превзойти ее. Тогда $dS_i < 0$, т.е. энтропия в систему не поступает (поступает с отрицательным знаком), а, наоборот, может из нее выводиться. Условие $dS = 0$ означает стационарное состояние, $dS < 0$ – рост и усложнение системы. Соответственно, изменение энтропии в этом случае определяется соотношением $dS_e \leq dS_i$, которое показывает, что энтропия, произведенная необратимыми процессами внутри системы, переносится в окружающую среду.

В стационарном состоянии $dS_e = - dS_i$. Это означает, что поступающий из окружающей среды поток тепла или вещества определяет отрицательный поток энтропии dS_e, который компенсируется положительным производством энтропии dS_i внутри системы из-за необратимых процессов в ней. Такой отрицательный поток показывает, что система поставляет энтропию внешнему миру, т.е. сбрасывает в него неупорядоченность и увеличивает энтропию окружающей среды. Если изменение энтропии, обусловленное связью с внешней средой, отрицательно, и по величине превосходит приращение энтропии внутри системы, то суммарное изменение энтропии будет отрицательно. Это означает, что энтропия в системе будет убывать и, следовательно, станет возможным увеличение порядка в системе. Естественно, за счет уменьшения порядка в окружающей среде.

Таким образом, эволюцию к более высокому порядку можно представить как процесс, в котором система достигает состояния с более низкой энтропией по сравнению с энтропией в начальном состоянии. По формулировке И.Р. Пригожина система эволюционирует к стационарному состоянию, характеризуемому ***минимальным производством энтропии***.

Поэтому И.Р. Пригожин и Гленсдорф сформулировали свой принцип так: при неравновесных фазовых переходах, т.е. в точках ***бифуркации***, через которые и происходит процесс самоорганизации, система идет по пути, отвечающему меньшему значению производства энтропии. Отсюда следует вывод: ***чем меньше производство энтропии при реальных процессах, тем более система организована.*** При наличии ***неустойчивости*** (хаотической компоненты системы) понятие изолированности теряет смысл: даже на малейшие воздействия (или с ростом флуктуаций и переходом их в бифуркации при внутренних процессах) отклик в системе может стать весьма существенным, и система становится открытой. По существу в этом и заключается **процесс самоорганизации** – ***создание определенных структур из хаоса, неупорядоченного состояния.*** Реальные системы как бы структурируют энергию из внешней среды – упорядоченная ее часть остается в системе, а неупорядоченную энергию система ***«сбрасывает»***, возвращает в природу, т.е. ***открытые системы «живут» за счет заимствования порядка из внешней среды.***

Таким образом, из переосмысления второго закона термодинамики был сделан вывод, что при отсутствии равновесия в системе **необратимость и возникающая энтропия** могут быть рассмотрены как **источник порядка**. При этом появление порядка может происходить **только в открытой системе с нелинейным (много вариантным) поведением.**

Стремление к ***самоорганизации*** присуще системам независимо от физической природы и иерархии построения системы. Хаотичность и нерегулярнсть сами по себе могут создавать порядок, который принципиально отличается от упорядоченности равновесных систем тем, что неравновесные упорядоченные системы существуют лишь при условии постоянного обмена с окружающей средой, а равновесные – без обмена. Физическим примером устойчивой, но неравновесной системы являются состояния инверсной

заселенности в лазерах при накачке энергией. В открытых системах наряду с нерегулярностью (хаосом) налицо и частичное упорядочение. Вообще энтропия ламинарного течения жидкости меньше, чем т4урбулентного, и возникновение реального процесса турбулентности из ламинарного сопровождается меньшим производством энтропии.

В связи с ***самоорганизацией*** сформулируем характерные признаки этого процесса:

- самоорганизация присуща лишь нелинейным движущимся системам;
- необходимость обмена энергией, веществом и информацией с внешней сферой;
- процессы должны быть кооперативными, когерентными;
- должен иметь место неравновесный термодинамический процесс, причем неравновесность – это такое состояние, когда приток энергии извне не только «гасит» рост энтропии, но и заставляет энтропию уменьшаться.

Таким образом, ***особенность синергетических систем***)состоит в том, что их развитие протекает путем нарастающей сложности и упорядоченности. Процесс самоорганизации в открытых системах может быть описан следующим образом. С поступлением новой энергии или вещества в ходе постоянного обмена системы со средой, неравновесность в системе возрастает. В конечном счета, прежняя взаимосвязь между элементами системы, которая определяет ее структуру, разрушается. Между элементами возникают новые связи, приводящие к кооперативным процессам, т.е. коллективному поведению ее элементов (их «сотрудничеству» – отсюда название «синергетика». Эти изменения в состоянии системы имеют характер фазовых переходов.

Первая фаза – период плавного эволюционного развития с хорошо предсказуемыми линейными изменениями. Малые изменения начальных условий возрастают до макроскопического уровня, приводящего в итоге систему к нелинейному неустойчивому критическому состоянию. Вторая фаза – одномоментный выход из критического состояния и переход в новое устойчивое состояние с большой степенью сложности и упорядоченности. Важная особенность второй фазы заключается в том, что переход системы в новое устойчивое состояние неоднозначен. Достигшая критических параметров (точки бифуркации) система из состояния сильной неустойчивости резко переходит в одно из многих возможных новых для нее устойчивых состояний. В этой точке эволюции путь системы разветвляется и выбирается одна из ветвей развития. Однако после того как система перешла в качественно новое устойчивое состояние – назад возврата нет. Здесь процесс необратим. Это значит, что развитие таких систем имеет принципиально непредсказуемый характер. Можно просчитать варианты возможных путей эволюции системы, но нельзя однозначно предсказать, какой из них будет выбран.

Процесс самоорганизации становится возможным при наличии ряда условий: система должна быть **открытой, неравновесной** (находится далеко от точки термодинамического равновесия), **нелинейной** (допускающей

вариативность, множественность путей ее развития). Находясь в **точке бифуркации**, система выбирает одни из возможных путей развития на основе **случайного** поиска. ***Случайность, таким образом, встроена в механизм эволюции, она становится элементом развития, появления нового.***

Явления, описываемые в рамках понятий бифуркации, самоорганизации и эволюции структур, относятся не только к физике. Они присущи природе в целом, и поэтому могут быть использованы во всех других науках, которые ее описывают: химии, биологии, геологии, географии, экологии. Это связано с тем, что методы анализа таких структур и применение математического аппарата те же самые, как и для нелинейных открытых физических систем. Большое сходство уравнений для описания этих явлений указывает на структурный изоморфизм процессов самоорганизации, изучаемых в естественных и гуманитарных науках.

Учитывая огромное количество реальных систем в природе и обществе, подчиняющихся законам синергетики, можно считать, что создание ***синергетической картины мира*** является по существу научной революцией, сравнимой по своим масштабам с открытием строения атома, созданием генетики и кибернетики. Синергетика убедительно показывает, что в самом фундаменте природы, как неживой, так и живой, заложен принцип **«инь» – «янь»**. ***Это – принцип развертывания и свертывания, эволюции и инволюции, развития и угасания, роста и вымирания, хаоса и порядка, устойчивости – неустойчивости.***

Самоорганизация в физике, химии, биологии. Не вдаваясь в достаточно сложную общую теорию диссипативных систем, можно привести несколько наглядных примеров самоорганизации в неживой и живой природе.

Модель Э. Лоренца. Рассмотрим качественно модель атмосферных процессов Э. Лоренца. Конвективное движение молекул воздуха в атмосфере возникает в результате совместного действия гравитационного поля Земли и градиента температур, создаваемого внешним источником тепла, например, океаном, нагретым Солнцем. В результате создаются конвективные потоки нагретого воздуха вверх и холодного воздуха – вниз. Это типичный хаотический процесс, т.е. неорганизованный и случайный. Однако ситуация может существенно измениться, если градиент температуры случайно превысит некоторое критическое значение. Тогда в общей атмосфере могут образовываться такие зоны, области, внутри которых теплый воздух поднимается вверх, а по краям этих зон холодный воздух движется вниз. Это приводит к саморегуляции теплового потока, и в целом возникает уже упорядоченное макроскопическое движение воздуха. Хаотическое движение становится упорядоченным. Хаос превращается в порядок! (Перестройка характера движения самоорганизации происходит благодаря внутренним свойствам самой системы при наличии внешней подпитки системы энергией.)

Ячейки Бенара. Первый классический пример упорядочения структуры из хаотического движения относится к гидродинамической неустойчивости в жидкости, открытый в 1900 г. **Бенаром.** На поверхности жидкости при определенных условиях возникает диссипативная пространственная структура, названная ***ячейками Бенара***. Для наглядности опишем опыт Бенара на «бытовом» уровне. На подогреваемую снизу сковороду наливают масло с металлическими опилками, и поэтому вверху образуется тяжелый слой. За счет подогрева, т.е. возникающего градиента температур, в результате действия сил тяжести и выталкивающей архимедовой, - подогретые легкие и тяжелые верхние слои стремятся поменяться местами. До какого-то момента этим внутренним движениям противодействует внутреннее трение - вязкость (поэтому для наглядности и было выбрано масло), но при достижении некоторой критической разности температур, так же, как и в модели Лоренца, возникает организованный конвекционный поток, и поверхностный слой масла вдруг, скачком, разделяется на правильные шестиугольные ячейки, напоминающие пчелиные соты, которые можно увидеть, покачивая сковородку. С позиций физики произошел фазовый переход – образовалась новая структура, но переход не равновесный, в неравновесный, требующий подвода внешней энергии.

Реакции Белоусова – Жаботинского. Второй классический пример относится к ***самопроизвольным периодическим химическим реакциям***, впервые открытым Б. Белоусовым в 1951 г., в которые никто из химиков не хотел поверить, так как из традиционной химии известно, что химические реакции необратимы. Поэтому при жизни Белоусова результат не был опубликован. Условием публикации было требование редакторов научных журналов теоретического объяснения механизма явления, что само по себе неправильно и несправедливо. Как и в предыдущих моделях Лоренца и Бенара, суть периодических реакций – в возникновении организованных потоков и структур, но только реализованных в химических реакциях, где важную роль играл специфический катализатор. При реакции окисления лимонной кислоты с таким катализатором в определенной последовательности возникали окислительно-восстановительные процессы, и раствор самопроизвольно периодически менял цвет. Внешне ***самоорганизация*** проявляется здесь в появлении в жидкой среде концентрических волн или периодическом изменении цвета раствора, например, с синего на красный и обратно (“химические часы”). Подобные реакции в дальнейшем широко исследовали и использовали для разных веществ, и они получили название ***реакций Белоусова–Жаботинского.*** Ныне известны и другие колебательные реакции, но реакция Белоусова–Жаботинского является в известном смысле исторической, поскольку она показала, что вдали от состояния равновесия вещество обретает новые свойства.

На экспериментальной основе реакции Белоусова–Жаботинского бельгийскими учеными во главе И. Пригожиным была построена теоретическая модель, названная ***брюсселятором*** (по имени столицы Бельгии

– Брюсселя). Они рассмотрели протекание реакции между двумя сортами непрерывно поступающих в реактор продуктов, причем количество этих веществ поддерживалось постоянным. После реакции продукты реакции выпадают в осадок, но все время в объеме присутствуют два промежуточных вещества. В реакции Белоусова промежуточные вещества периодически мерцали, создавая эффект изменения цвета раствора. Расчет дает колебательный режим при определенном соотношении реагентов, изменение соотношений между реагентами меняет характеристики колебаний концентраций промежуточных продуктов реакции. Уравнения, описывающие этот процесс, совпали с уравнениями ***автоколебательных систем*** (электрических или механических). Если добавить условия, соответствующие хорошему перемешиванию продуктов в объеме, модель сильно усложняется (она получила название точечной), но устойчивые во времени и пространстве структуры промежуточных продуктов сохраняются. Эти структуры спонтанно возникают под действием термодинамических сил в далекой от равновесия системе, когда ее параметры превышают критические значения, т.е. происходит перестройка в системе, называемая *самоорганизацией.* Группа Пригожина создала специальную модель для изучения волновых явлений реакции Белоусова-Жаботинского, названную ими реакцией в системе БМФ (аббревиатура от слов: бромид – бромималоновая кислота – ферроин). В этом случае могут наблюдаться ***самовозбуждающиеся волны***, или, говорят об образовании волнообразных пространственно–временных диссипативных структур, Волна концентрации возникает в начале реакции, отражаясь от стенок реактора. Источником ее являются мелкие неоднородности среды или небольшие повышения концентрации кислоты, т.е. случайные неоднородности или флуктуации, которые до некоторых пор гасятся силами внутренней инерции. Помещая мелкие неоднородности в раствор можно управлять этими волнами, делать их сферическими или спиральными. Эта модель легла в основу исследований новой термодинамики, которую часто называют ***неравновесной***, или ***нелинейной***. Как отмечает И. Пригожин:

Переход от термодинамики (правильнее термостатики) равновесных состояний к термодинамике неравновесных процессов, несомненно, знаменует прогресс в развитии ряда областей науки.

Автоволны и самоорганизация. Реакции, приводящие к временным структурам в химии, могут быть отнесены к колебательным реакциям – ***автокаталитическим*** по химической терминологии или к ***автоволновым процессам*** по физической терминологии. В автокаталитических реакциях продукты каталитически ускоряют саму реакцию, и скорость ее растет с ростом концентрации ее продуктов. ***Автоволны*** – самоподдерживающиеся волны, которые распространяются в активных средах с распределенной запасенной энергией, или в таких, в которых подводится энергия извне. За счет ***обратной связи*** между отдельными стадиями сложной реакции или любыми частями самоорганизующейся системы автоволны могут поддерживать свои

характеристики. ***Автоволновые процессы***, которые относят к самоорганизующимся процессам, получили свое развитие в работах представителей русской школы теории колебаний, в том числе в нелинейных средах, ***Л. Мандельштама (1879–1977), А. Андронова (1901–1952), Р. Хохлова (1926–1977), С. Ахманова (1933–1994)***. Можно даже сказать, что это был ***«русский подход»*** к проблеме самоорганизации. Они имеют более глубокий смысл, поскольку на их основе анализируют многие процессы в природе и обществе, не только при химических реакциях, в том числе и в процессах горения и окисления, передачи информации, например, в биологии, географии, этнографии, социологии и других науках. Отметим, что Пригожин и его Брюссельская школа, занимающаяся неравновесной термодинамикой, избегают синергетической терминологии, введенной Хакеном для динамики неустойчивых структур.

Самоорганизация в биологии. ***Автоволны*** – это самоподдерживающиеся волны, которые распространяются в активных средах или средах, поддерживаемых энергетически. Именно за счет внутренних источников среды автоволны способны поддерживать свои характеристики, поэтому ***автоволны*** были открыты при передаче возбуждения по нервным волокнам, мышцам, сетчатке глаза, при анализе численности популяций и т.д. Волна возбуждения движется по возбудимой среде без затухания, потери на диссипацию полностью поддерживаются подводом энергии извне.

Типичный пример такой автоволны – ***нервный импульс***, который бежит без затухания по нервному волокну диаметром менее 0,025 мм и длиной до 1,5 м. ***Нервное волокно*** – плохой проводник, его электрическое сопротивление в 100 млн. раз большее сопротивления медного провода такого же сечения, и потому без подпитки энергии такой импульс затух бы очень быстро. Один раз в секунду по сердцу пробегает ***автоволна*** – волна временного уменьшения разности электрических потенциалов между наружной и внутренней сторонами мембраны сердечных клеток. Распространяясь по сердцу, эта волна возбуждения запускает механизм сокращения сердечной мышцы. Именно этот электрический потенциал, создаваемый волной, и регистрируется на электрокардиограмме. Нейрофизиологические исследования показывают, что обработка информации в коре головного мозга ведется не на уровне активности отдельных нейронов (как и ЭВМ), а на уровне взаимодействия между ***автоволными*** возбуждения и торможения, которые охватывают обширные участки мозга.

Скорость распространения ***нервного импульса*** впервые измерил **Гельмгольц** в 1850 г. (по современным данным она равна 0,5–120 м/с). Волны электрического возбуждения исследовались детально с начала XX в. Свойства нервного импульса, типичные для автоволн (универсальная форма и амплитуда, не зависящие от начальных условий; аннигиляция при столкновениях) были установлены в 20–30 годы, но их не сопоставляли с явлениями в других областях. Волны возбуждения в сердечной мышце в то же время обнаружили Т. **Льюис** и В. **Гери**, причем с теми же свойствами, что и у нервного импульса.

Стало известно, что в ткани сердца возможна циркуляция волны вокруг анатомических препятствий. Близкими свойствами обладают волны в коре головного мозга.

Автоволна возбуждения – это сильное нелинейное образование. Ее распространение описывается нелинейными уравнениями. Такая волна однозначно определяется средой, и ее характеристики ***не*** зависят от начальных условий: она локализована в пространстве – до и после ее прохождения элементы среды остаются в покое. В отличие от автоволн, единичные волны – ***солитоны*** – сильно зависят от начальных условий. В одной и той же среде можно создать солитоны, которые двигаются с разными скоростями и имеют разную амплитуду, при диссипации солитоны будут испытывать торможение. ***Солитоны*** – тоже нелинейные объекты, поэтому для них не выполняется принцип суперпозиции, хотя они во многом похожи на обычные частицы – воссстанавливают форму после столкновения и не обладают свойством аннигиляци как автоволны.

Самоорганизация и фазовые переходы. Рассмотрение общих свойств самоорганизующихся систем в неживой природе было бы неполным, если не указать на аналогию с **фазовыми переходами.** В 1970 г. ее отметили несколько ученых, работавших в квантовой электронике: немецкие ученые **Грэхем** и **Хакен** и итальянские – **Де Джиржио** и **Скулли**. Например, если рассматривать свет от лазера, и свет от лампы накачки, то можно сказать, что он претерпел ***фазовый переход*** и изменил свои свойства – стал когерентным, более узким в спектральном диапазоне и усиленным по направлению испускания. Сначала такая аналогия казалась поверхностной, но с каждым параметром фазового перехода в парамагнетике удалось сопоставить соответствующий параметр квантовой генерации. Возражение, касающееся искусственности создания самого прибора, творящего эти превращения со светом, были сняты, когда была открыта ***мазерная генерация*** в космическом пространстве, происходящая естественным путем.

Наглядной иллюстрацией ***процессов самоорганизации*** может служить работа ***лазера***, с помощью которого можно получать мощные оптические излучения. Не вдаваясь в детали его функционирования, отметим, что хаотические колебательные движения составляющих его частиц, благодаря поступлению энергии извне, при достаточной его “накачке”, приводятся в согласованное движение. Они начинают колебаться в одинаковой фазе, и вследствие этого мощность лазерного излучения многократно увеличивается. Этот пример свидетельствует, что в результате взаимодействия со средой за счет поступления дополнительной энергии прежние случайные колебания элементов такой системы, как лазер, превращаются в когерентное, согласованное коллективное движение. На этой основе возникают кооперативные процессы, и происходит самоорганизация системы.

Хакен выделил ***коллективные процессы*** во всех самоорганизующихся системах: коллективно самоорганизуются молекулы в узлах кристаллической

решетки, коллективно выстраиваются элементарные магнитные моменты (спины) в ферромагнетике, коллективно и согласованно самоорганизуются вихри внутри жидкости, порождая видимую на макроскопическом уровне структуру. Возбуждаясь в рабочем веществе лазера, атомы самосогласованно и коллективно испускают когерентное излучение. Итак, **кооперативность** – ***общая черта процессов самоорганизации.*** Кроме того, инверсная населенность, как и неравновесное состояние в жидкостях, должна поддерживаться внешней средой, только в этом случае возникающие структуры будут ***устойчивы***. Устойчивые структуры возникают при ***обмене с внешней средой*** энергией (или веществом – для биологических систем), которые могут поддерживать отклонение от равновесия. Этот внешний поток не только гасит рост энтропии, но может привести к ее понижению.

И еще: для самоорганизующихся систем непременным атрибутом является **сложное движение**, описываемое ***нелинейными уравнениями***, и **пороговый характер возникновения.**

Эти самоорганизующиеся системы и процесс самоорганизации математически оформили следующим образом: сначала просто записали связь эффекта с его причиной в зависимости от времени, а потом исключили внешнее воздействие, предоставив систему самой себе. **Хакен** расширил систему так, чтобы включенные в уравнения внешние силы стали силами внутренними, и описал механизм нарастания внутренних флуктуаций с помощью введения стохастического члена. В дальнейшем он разработал теорию ***лазерной генерации*** как фазового перехода, а потом ***теорию гидродинамических неустойчивостей*** как фазовых переходов, для которых сумел получить не только теоретическое подтверждение факта существования **ячеек Бенара**, но и описание положения шестиугольных цилиндров и их диаметров. И каждый раз в этой аналогии открывались более глубинные черты. В частности, развиваемый метод дал интересные результаты при рассмотрении фазового перехода – разрушение упругой конструкции (моста, например). Так стал работать новый ***синергетический метод,*** основанный на идее синтеза. (С***инергетика*** переводе с древнегреческого означает ***совместное действие***, или ***взаимодействие)***.

Примеры простых и поддающихся математическому описанию, иногда даже на динамическим уровне, систем были обнаружены в физике (образование устойчивых вихрей в нестационарных потоках жидкостей и газов; возникновение упорядоченного излучения в лазерах; образование и рост кристаллов), химии (концентрационные колебания в реакции Белоусова–Жаботинского). Сходные по внешнему проявлению процессы имеются в биологии (морфогенез, колебания численности популяций), экономике (колебания занятости населения), политике и социологии (формирование общественного мнения) и т.д.

Открытие самоорганизации в простейших системах неорганической природы, прежде всего в физике и химии, имеет огромное научное и философско–мировоззренческое значение. Оно показывает, что такие процессы могут происходить в фундаменте самого «здания материи», и тем самым

проливает новый свет на взаимосвязь живой природы и неживой. С такой точки зрения возникновение жизни на Земле не кажется теперь таким редким и случайным явлением, как об этом говорили многие ученые раньше. С позиции самоорганизации становится также ясным, что ***весь окружающий нас мир и Вселенная представляют собой совокупность разнообразных самоорганизующихся процессов, которые служат основой любой эволюции.***

Несмотря на внешнее разнообразие самоорганизующихся систем, все они имеют ***сходные особенности***, которые, по-видимому, носят обязательный характер для возникновения феномена самоорганизации.

1. Самоорганизующиеся системы ***сложны,*** т.е. состоят из нескольких элементов и подсистем.
2. Самоорганизующиеся системы ***нелинейны,*** т.е. описывающие их динамику математические уравнения существенно ***нелинейны.***
3. Самоорганизующиеся системы должны быть ***открытыми,*** т.е. должен существовать поток энергии, вещества и т.п. из внешних систем, поддерживающий самоорганизующуюся систему в термодинамически неравновесном состоянии.

Поясним, что понимается под ***нелинейностью*** и в термодинамике и теории самоорганизации вообще. Отличительная черта ***моделей***, описывающих открытые системы и процессы самоорганизации, состоит в том, что в них используются ***нелинейные математические уравнения***, в которых входят переменные в степени выше первой (линейной). Хотя нелинейные уравнения и до сих пор часто применяются в физике и точном естествознании в целом, они оказываются неадекватными для описания открытых систем или же при весьма интенсивных воздействиях на системы. Именно с подобными системами и процессами имеет дело неравновесная термодинамика, и поэтому ее нередко называют нелинейной.

Математический формализм описания самоорганизующихся систем возник буквально в последние годы и завоевывает себе популярность в различных областях естествознания столь быстрыми темпами, что краткий обзор наиболее часто используемых в его рамках терминов необходим даже при кратком знакомстве с проблемами современной науки. Наличие характерного практически для любой молодой дисциплины обилия новых терминов свидетельствует не столько о ее сложности, сколько о незавершенности.

Связь системы с внешним миром описывается при помощи ***параметров управления*** (в качестве таких параметров могут выступать внешние силы, подводимая в систему энергия, потоки вещества и т.д.). Самоорганизация возникает при значениях параметров управления, лежащих внутри определенных интервалов значений. Выход за рамки этих интервалов приводит к изменению типа поведения системы (изменению ее

пространственно–временных структур), часто к разрушению самоорганизации и замене ее ***хаосом.***

Динамический хаос. Известно, что диссипативные структуры возникают вдали от равновесия и дают возможность перехода к «организованному» хаосу. В них возникают непредсказуемые, т.е. случайные, но организованные потоки. Более корректно такой хаос называют ***динамическим*** или ***детерминированным хаосом***. Детерминированность, т.е. определенность, проявляются в том, что конвективные потоки возникают обязательно, и они при определенных условиях организованы, упорядочены, а хаос проявляется в непредсказуемости места и времени появления конвективных потоков. Динамический хаос можно воспринимать как динамику частиц или объектов в условиях хаотического их движения. Реальное хаотическое движение с учетом случайных источников, например, движение атомов и молекул в состоянии равновесия, можно обозначить как «физический» или статический хаос. Детерминированный хаос может порождать упорядоченные структуры, но очень небольшие изменения начальных условий могут кардинально изменить сам характер движения, т.е. сделать его динамически неустойчивым. Поскольку начальные условия задаются с конечной точностью, то предсказание характера движения становится невозможным. Теперь нам понятно, почему долгосрочные прогнозы погоды, которые мы регулярно слушаем и удивляемся их неточности, так далеки от реальной погоды за окном. Такой прогноз из-за наличия динамической неустойчивости в атмосфере является чрезвычайно трудной задачей.

Аттракторы. Эволюцию динамической системы можно анализировать в абстрактном пространстве состояний – **фазовом пространстве**, в котором можно ввести координаты, описывающие состояние системы, в частности **фазу** системы. Совокупность последовательных положений системы в фазовом пространстве составляет **фазовую траекторию**. Выстраивая такую траекторию в фазовом пространстве, необходимо указывать направление перемещения системы по фазовой траектории во времени.

Состояние любой системы (в том числе и самоорганизующейся) может быть описано ***точкой*** в конфигурационном пространстве, размерность которого совпадает с числом степеней свободы системы. Изменение состояния системы сопровождается перемещением изображающей ее точки. В случае самоорганизующихся систем траектории изображающих их точек с течением времени часто не уходят на бесконечность, собираясь вблизи особых точек или замкнутых кривых. В случае существования таких точек или их множеств к ним сходятся («притягиваются») целые семейства траекторий, начинающихся в различных точках конфигурационного пространства (рис. 9.1.). Описанные особенности получили название **аттракторов.** Таким образом, ***аттракторы*** – точки в фазовом пространстве, притягивающие траекторию развивающейся динамической системы. Оказалось, что структуру ***аттракторов*** (а значит, и конечное состояние системы) можно проанализировать, не решая всю

совокупность нелинейных уравнений, описывающих самоорганизующуюся систему. Кроме аттракторов типа «центр», могут быть такие точки типа «фокус», аттрактор с потерей энергии, диссипацией ее и типа «седло». Из рисунков видно, что траектории притягиваются, но не пересекаются. Такой анализ на ранней стадии позволяет прогнозировать поведение исследуемой динамической системы. Из аттракторов типа «седло» уже можно сделать вывод, что траектории могут расходиться. Такие точки с расходящимися аттракторами получили название **странных аттракторов**. Странные аттракторы – это, по существу математический образ сложного движения, как выяснилось, именно в нелинейных диссипативных динамических системах. Странность аттракторов заключается в том, что в отличие от обычного аттрактора, который характеризует устойчивость динамической системы, все траектории вокруг него динамически неустойчивы, и эта неустойчивость проявляется в перемешивании траекторий в фазовом пространстве.

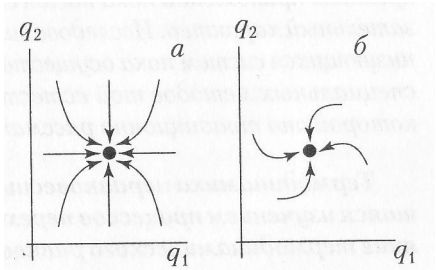

Рис. 9.1. Примеры устойчивых аттракторов в случае двумерного пространства обобщенных координат q_1 и q_2: *а* — полюс; *б* — фокус.

Допустимые типы ***аттракторов*** зависят от размерности конфигурационного пространства, описывающего систему. В одномерном случае в качестве устойчивых аттракторов могут выступать устойчивые неподвижные точки - ***полюса*** (соответствуют нахождению системы в состоянии устойчивого равновесия). В двумерном случае помимо устойчивых точек (***полюсов и фокусов***) возникает возможность ***устойчивых предельных циклов*** (замкнутые кривые, описывающие периодически повторяющееся движение системы). В трехмерном случае к указанным возможным типам аттракторов добавляются ***устойчивый тор*** (описывает квазипериодическое движение, при котором система периодически практически восстанавливает свою конфигурацию, но численные значения ее параметров никогда точно не повторяются) и ***странный аттрактор*** (описывает возникновение состояния ***хаоса***, при котором параметры системы изменяются в ограниченных пределах, но ее состояния не повторяются даже с точки зрения качественного рассмотрения). Итак, ***хаос*** – (в синергетике) *состояние системы, в котором траектория изображающей ее точки в конфигурационном пространстве является странным аттрактором).*

Фрактальное строение пространственных структур в природе, принцип самоподобия в неживой материи.

Важнейшим свойством странных аттракторов является **фрактальность.** ***Фракталы*** – это объекты, проявляющие по мере увеличения все большее число деталей. Их начали активно исследовать с появлением мощных ЭВМ. Известно, что прямые и окружности – объекты элементарной геометрии – природе не свойственны. Структура вещества чаще принимает замысловато ветвящиеся формы, напоминающие обтрепанные края ткани. Примеров подобных структур много: это и коллоиды, и отложения металла при электролизе, и клеточные популяции.

Хаос порождает фракталы, а фазовая траектория фракталов обладает **самоподобием**, т.е. при выделении двух близких точек на фазовой траектории фрактала и последующем увеличении масштаба траектория между этими точками окажется столь же хаотичной, как и вся в целом. В программе ЭВМ это увеличение масштаба достигается уменьшением временного шага при решении динамических уравнений. Траектория броуновской частицы (открытое Броуном в 1827 г. хаотическое движение мельчайших частиц в жидкости) тоже обладает фрактальными свойствами. Фракталы имеют дробную размерность (англ. f*ractial "*дробный*").* Термин введен Б. **Мандельбротом** в 1977 г. в книге "Форма, случайность, размерность". По мнению автора введение фрактальных множеств позволяет объяснить и предсказать многие явления в самых различных областях.

Пороговый характер самоорганизации и представления теории катастроф. Согласно теории об устойчивости движения можно судить по знаку производной функции, описывающей это движение вблизи стационарной точки. Если смена знака первой производной определяет характер устойчивости, то при одних значениях параметров система устойчива, а при других – может наступить переход от устойчивого движения к неустойчивому, в общем случае – от одного режима к другому.

Можно ввести величину ***критического порогового параметра***, когда система переходит в другое состояние, меняет характер динамического поведения при изменении управляющего параметра, которым, по существу, является рассмотренная ранее ***бифуркация***.

Ранее отмечался пороговый характер всех самоорганизующихся процессов. Термодинамика связала его с неустойчивостью – новая структура есть результат неустойчивости и возникает из флуктуаций. В "допороговом" состоянии флуктуации затухают и не проявляются макроскопически, например, в конвекционном потоке при малых **T** они рассасываются за счет сил вязкого трения. Выше порога флуктуации не рассасываются, а усиливаются, достигают макроскопических значений и выводят систему на новый устойчивый режим, создают новую структуру, возникающую после неустойчивости, Математически это связано с нелинейностью уравнений, описывающих систему вдали от равновесия. Если линейное уравнение имеет одно

стационарное решение, то нелинейное – несколько. Система может принимать любое из этих состояний, и переход из одного в другое стационарное состояние соответствует преодолению порога.

Бифуркации и катастрофы.

Изменение значений управляющих параметров приводит к изменению структуры аттракторов системы. Явление перестройки структуры аттракторов называется ***бифуркацией.*** При бифуркациях система оказывается в крайне неустойчивых состояниях, чувствительных к бесконечно малым изменениям ее управляющих параметров. Именно в этих точках эволюции системы малые случайные статистические флуктуации способны привести к глобальному изменению дальнейшего развития. По-видимому, именно эти точки являются определяющими для развития систем, в ходе которого периоды относительно детерминированного начальными условиями поведения разделяются моментами, когда непредсказуемые случайности носят определяющую роль.

Итак, переход скачком в новое состояние с потерей линейности законов называется первой бифуркацией. С ростом числа непериодических колебаний в системе, чувствительным к изменениям начальных условий, в фазовом пространстве системы появляются траектории, притягивающие другие. Эти области называются аттракторами. При удвоении периодов неустойчивых колебаний происходит переход к третьей бифуркации, или состоянию хаоса. В каждой очке бифуркации поведение системы разветвляется, а с третьей начинается хаотическое состояние, скрывающее упорядоченность, поэтому такой хаос называется динамическим, или детерминированным.

В математике ***катастрофой*** называют скачкообразное изменение, которое может возникнуть в ответ на плавное изменение внешних условий. Для систем это означает потерю устойчивости. Область математики, занимающаяся катастрофами, называется ***теорией катастроф.*** Она является в некотором роде обобщением исследования функций на экстремум на случай многих переменных и опирается на теорию особенностей гадких отображений. Отображение поверхности на плоскость есть сопоставление каждой точке поверхности точки плоскости.

Теория катастроф позволяет свести огромное многообразие сложных ситуаций к небольшому числу ***точно*** изученных систем. Математические образы теории катастроф реализуются в волновых полях. Известны геометрические места точек, в которых происходит фокусировка волнового поля, называемые в оптике *каустиками.* При пересечении каустик происходит скачкообразное изменение состояния – меняется число лучей, приходящих в данную точку пространства. Для 1-2 переменных и не более 5 управляющих параметров существует семь типов элементарных катастроф. Все семь канонических катастроф имеют в каустиках свои образы. Теория катастроф, широко используемая в метеорологии, аэро- и гидродинамике, оптике, теории кооперативных явлений, квантовой динамике и др., подводит стандартную и эффективную базу под описание качественных изменений в нелинейных уравнениях, описывающих далекие от равновесия системы.

Математические закономерности эволюции. Если **теория катастроф** описывает области устойчивости структур, то развитие во времени этой статической картины во времени дается **теорий бифуркаций.** Изменения ***управляющих параметров*** способны вызывать катастрофические (большие) скачки переменных состояний, и эти переходы осуществляются почти мгновенно (скачком). Момент перехода определяется свойствами системы и уровнем флуктуаций в ней. При таком переходе выделяют два принципа: принцип ***максимального промедления***, определяемый существованием устойчивого уровня, и ***принцип Максвелла***, определяющий состояние системы глобальным минимумом. Каждому из этих принципов соответствует множество точек в пространстве управляющих параметров, в котором происходит переход из одного локального минимума в другой. Последовательность бифуркаций, возникающая при углублении неравновесности в системе, меняется, и процесс пойдет по разным сценариям. Исследования сценариев связаны с анализом свойств странных аттракторов, к которым (как и к обычным) притягиваются точки (состояния системы) в многомерном фазовом пространстве. Введение т понятия аттракторов является несомненной заслугой теории катастроф, как и пропаганда знаний об их бифуркациях. Сейчас к этому термину привыкли и находят их во всех областях теории колебаний. Фонемы речи, к примеру, называют аттракторами звукообразующей динамической системы.

Итак, переход скачком в новое состояние с потерей линейности законов называется первой бифуркацией. С ростом числа непериодических колебаний в системе, чувствительным к изменениям начальных условий, в фазовом пространстве системы появляются траектории, притягивающие другие. Эти области называются аттракторами. При удвоении периодов неустойчивых колебаний происходит переход к третьей бифуркации, или состоянию хаоса. В каждой точке бифуркации поведение системы разветвляется, а с третьей начинается хаотическое состояние, скрывающее упорядоченность, поэтому ***такой хаос называется динамическим, или детерминированным.***

Третий тип физической рациональности.