

# Открытые системы и самоорганизация

## Открытые системы

Организм человека как открытая система



Открытая система – это система, обменивающаяся веществом и энергией с окружающей средой. Существует свойства открытых систем, находящихся вдали от равновесного состояния: они оказываются неустойчивыми и возврат к начальному состоянию является необязательным. В некоторой точке, называемой бифуркацией (разветвлением), поведение системы становится неоднозначным.

При наличии неустойчивости изменяется роль внешних воздействий. В определенных условиях ничтожно малое воздействие на открытую систему может привести к значительным непредсказуемым последствиям (раскрытие неустойчивости).

В открытых системах, далеких от равновесия, возникают эффекты согласования, когда элементы системы коррелируют свое поведение на макроскопических расстояниях через макроскопические интервалы времени. Такое кооперативное, согласованное поведение характерно для систем различных типов: молекул, клеток, нейронов, отдельных особей и т.д.

В результате согласованного взаимодействия происходят процессы упорядочения, возникновения из хаоса определенных структур, их преобразования и усложнения. Чем больше отклонение от равновесия, тем больший охват корреляциями и взаимосвязями, тем выше согласованность процессов, даже протекающих в отдаленных областях и, казалось бы, не связанных друг с другом. Сами процессы характеризует нелинейность, наличие обратных связей и связанные с этим возможности управляющего воздействия на систему.

Теория состояний, далеких от равновесия, возникла в результате синтеза трех направлений исследований:

1. Разработка методов описания существенно неравновесных процессов на основе статистической физики. В рамках этого направления создаются кинетические модели, определяются параметры, необходимые для описания, выявляются корреляции, крупномасштабные флуктуации, устанавливаются закономерности перехода в состояние равновесия.

2. Разработка термодинамики открытых систем, изучение стационарных состояний, сохраняющих устойчивость в определенном диапазоне внешних условий, поиск условий самоорганизации, т. е. возникновения упорядоченных структур из неупорядоченных. Было показано, что процессы диссипации энергии являются необходимым условием самоорганизации, поэтому возникающие структуры получили название диссипативных.

Г.Хакен предложил называть эту область исследований синергетикой (от греческого «синергетикос» – совместный, согласованно действующий).

3. Определение качественных изменений решений нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих состояния далекие от равновесия, в зависимости от входящих параметров. Этот раздел математики получил название теории катастроф. С ее помощью описываются качественные перестройки общей структуры решений – катастрофы, определяются границы устойчивости и изменения структуры состояний.

Синтез этих трех направлений дал новую область знаний, занимающуюся описанием состояний, далеких от равновесия. С ее помощью удалось сформулировать общий подход к целой совокупности явлений природы и общества. Ее называют по-разному: синергетика, теория открытых систем, теория диссипативных структур, термодинамика необратимых процессов. Есть названия, связанные со свойствами неустойчивости, нелинейности.

Исходным пунктом для данной области исследований явилась классическая кинетика процессов в газах, начатая работами Дж. Максвелла и Л. Больцмана.

Затем произошло расширение области исследования на слабонеравновесные системы в различных средах и условиях. С 1950 года началось широкое изучение систем, находящихся далеко от состояния равновесия из-за действия сильных полей и жестких излучений различной природы.

На сцену вышел качественно новый фактор – квантованность энергетических состояний молекул. Ранее, по существу, рассматривалось только поступательное движение бесструктурных частиц. При сильном отклонении от равновесного состояния возбуждение охватывает различные степени свободы молекул – вращательные, колебательные, электронные. Возникает необходимость детального учета квантовой структуры вещества. В этих условиях частицы уже нельзя считать бесструктурными, а нужно рассматривать их эволюцию в фазовом пространстве многих степеней свободы.

Свойства атомов и молекул в различных энергетических состояниях различны. За счет неравновесных процессов происходит быстрое перераспределение заселенностей по большому числу термов и неизвестно какой из них окажется в данной конкретной системе наиболее реакционноспособным. Поэтому реакция существенно неравновесной системы на внешнее воздействие может быть неожиданной. Примером может служить диссоциация многоатомных молекул (ангармонических осцилляторов) при охлаждении газа в условиях накачки энергии. Этот эффект использовался для получения свободных атомов при низких температурах, что сыграло существенную роль в разработке химических лазеров. Другим примером нетривиального поведения существенно неравновесной системы является кратковременное охлаждение углекислого газа при резонансном поглощении излучения молекулой CO<sub>2</sub>.

В данном случае принципиально то, что при рассмотрении открытых систем, внешние параметры играют роль регуляторов, с помощью которых можно управлять процессами. Очень существенным моментом является то, что энергетические затраты на управление с помощью этих регуляторов намного меньше, чем требуется для достижения того же эффекта в равновесных условиях. Причем эффективность воздействия зависит от степени неравновесности системы.

В ряде случаев элементы системы начинают действовать в неравновесных условиях согласованно, обнаруживая свойства, не присущие отдельной частице. Эти общие свойства получили название когерентных или кооперативных свойств. При приближении системы к состоянию равновесия сначала разрушаются когерентные связи, а затем уже связи, определяемые энергетическими заселенностями. Когерентность определяется возникновением корреляций (взаимосвязей и взаимозависимостей) между частицами. Математически это выражается необходимостью рассмотрения функции распределения не

одной частицы, а нескольких взаимодействующих. Н.Н.Боголюбов разработал единый подход рассмотрения всей совокупности функций распределения – цепочек уравнений для последовательных функций увеличивающегося числа взаимодействующих частиц.

Этот метод назван цепочками ББГКИ, по имени ученых, внесших основной вклад в их разработку: Н.Н.Боголюбов, М.Борн, Х.Грин, И.Кирквуд, И. Ивон. Так функция  $n$  переменных  $f_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, t)$  учитывает корреляции  $n$  частиц. Если масштаб корреляции уменьшается и взаимодействуют только  $n-1$  частиц, то переходят к  $f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, t)$  функции. При сглаживании неравновесности (переходе к состоянию равновесия) корреляции разрушаются, сокращается набор функций, необходимых для описания поведения системы, а сами функции зависят от все меньшего числа частиц.

В пределе остаются лишь одночастичные функции распределения, уравнения которых составляют основу обычной кинетики.

Метод цепочек ББГКИ имел исключительно большое значение в неравновесной статистической физике. Это был, по существу, новый подход к проблеме необратимости. В замкнутой системе уравнения динамики (классической или квантовой) обратимы, т. е. замена  $t$  на  $-t$  их не меняет. При обрыве цепочки, когда нарушается корреляция высших порядков, возникает необратимость. В этом случае четко видна причина необратимости.

Разрушение корреляции может быть вызвано внешним воздействием. Но чем больше и упорядоченная система, тем выше масштаб корреляций. Это означает, что они действуют между большим числом частиц, на больших расстояниях и в течение большого промежутка времени. Следовательно, нужно меньшее воздействие для нарушения такой сложной корреляции. А так как абсолютно изолированных систем нет, то необратимость нашего мира заложена в природе вещей в силу всеобщей связи.

В случае изолированных (закрытых) систем, в которых нет никаких обменов с внешней средой, необратимость выражена знаменитым вторым законом термодинамики, в соответствии с которым существует функция переменных состояния системы, изменяющаяся монотонно в процессе приближения к состоянию термодинамического равновесия. Обычно в качестве такой функции состояния выбирается энтропия, и второе начало формулируется так: «производная энтропии по времени не отрицательна». Традиционно это утверждение интерпретируется как «тенденция к возрастанию разупорядоченности» или как «производство энтропии».

В случае неизолированных систем, которые обмениваются с внешней средой энергией или веществом, изменение энтропии будет обусловлено процессами внутри системы (производство энтропии) и обменами с внешней средой (поток энтропии). Если производство энтропии в соответствии со вторым законом термодинамики неотрицательно, то «поток энтропии» может быть как положительным, так и отрицательным. Если поток энтропии отрицательный, то определенные стадии эволюции могут происходить при общем понижении энтропии. Последнее, согласно традиционной трактовке, означает, что «в ходе эволюции разупорядоченность будет уменьшаться за счет оттока энтропии».

## **Примеры самоорганизации в неживой природе**

Ячейки Х. Бенара. Классическим примером возникновения структуры является конвективная ячейка Бенара. Если в сковородку с гладким дном налить минеральное масло, подмешать для наглядности мелкие алюминиевые опилки и начать нагревать, мы получим довольно наглядную модель самоорганизующейся открытой системы. При небольшом перепаде температур передача тепла от нижнего слоя масла к верхнему идет только за счет теплопроводности, и масло является типичной открытой хаотической системой. Но при

некотором критическом перепаде температур между нижним и верхним слоями масла в нем возникают упорядоченные структуры в виде шестигранных призм (конвективных ячеек), как это показано на рисунке 1.

Рисунок 1.

В центре ячейки масло поднимается вверх, а по краям опускается вниз. В верхнем слое шестигранной призмы оно движется от центра призмы к ее краям, в нижнем – от краев к центру. Важно отметить, что для устойчивости потоков жидкости необходима регулировка подогрева, и она происходит самосогласованно. Возникает структура, поддерживающая максимальную скорость тепловых потоков. Поскольку система обменивается с окружающей средой только теплом и в стационарном состоянии (при  $T_1$ ) получает тепла столько, сколько отдает (при  $T_2 < T_1$ ), то

$$S=(Q/T_1)-(Q/T_2) < 0,$$

т.е. внутренняя структура (или самоорганизация) поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии, или негэнтропии из окружающей среды. Подобные конвективные ячейки образуются в атмосфере, если отсутствует горизонтальный перепад давления.

Работа лазера. Рабочей средой твердотельного лазера является рубиновый стержень, на концах которого устанавливаются два качественных зеркала (резонатор). С помощью мощной лампы накачки атомы рубина приходят в возбужденное состояние и начинают излучать. Вначале их излучение является хаотическим, независимым друг от друга, и лазер работает как обычная лампа. Но при определенном (критическом) значении мощности накачки происходит скачкообразный переход работы лазера от хаотического излучения к самосогласованному. Коллективное излучение атомов становится когерентным, т.е. упорядоченным.

Рисунок 2.

Химические часы. Самоорганизация в химических системах связана с поступлением извне новых веществ, которые обеспечивают продолжение реакции, и выведением в окружающую среду отработанных.

Такие реакции были получены в 50-х годах 20-го века советскими учеными Б. Белоусовым и А. Жаботинским. Однако полученные ими результаты были настолько необычными, что ученые долго не могли опубликовать их. Лишь в 80-х годах они получили признание. Суть реакции Белоусова – Жаботинского состоит в окислении органической (малоновой) кислоты бромидом калия. При добавлении индикатора окислительно-восстановительных реакций (ферроина) можно наблюдать за ходом реакции по периодическому изменению цвета раствора. Внешне самоорганизация проявляется появлением в жидкой среде концентрических волн или в периодическом изменении цвета раствора с синего на красный и наоборот (рисунок 2). Этот колебательный процесс идет без всякого вмешательства извне в течение нескольких десятков минут и получил название «химических часов».

Следует заметить, что колебания происходят около неустойчивого стационарного состояния вдали от состояний равновесия. (Около устойчивых стационарных состояний такие периодические колебания невозможны)

### **Самоорганизация в социальных системах**

Попытки объяснить механизмы самоорганизации, которые начались, по существу, еще в 18-м веке, не обошли стороной и общественные науки. Основоположник классической политической экономии А. Смит (1723-1790) в своем главном труде «Исследование о природе и причинах богатства народов» показал, что спонтанный порядок на рынке является результатом взаимодействия различных, часто противоположных стремлений, целей и интересов его участников. Такое взаимодействие приводит к установлению никем не запланированного порядка, который выражается в равновесии спроса и предложения. А. Смит использовал метафору «невидимой руки», которая регулирует цены на рынке.

Подобные же идеи высказывались в то время и относительно самоорганизации норм нравственности в обществе. При этом идеи самоорганизации, самосовершенствования деятельности социальных систем связывались с эволюционными процессами. И вот в конце 20-го века ответ на многие поставленные вопросы пришел из естественных наук, когда было обнаружено поразительное сходство процессов самоорганизации на самых различных структурных уровнях материи.

Социальные системы, так же как и природные – столь же сложные и нелинейные. В них возможны изменения структурных связей, кризисы и катастрофы, в том числе экологические и экономические. И здесь большое значение имеет возможность, опираясь на методы синергетики, определить условия нарушения прежней устойчивости и возможность перехода в новое состояние, сопровождаемое структурными изменениями.

Стохастическая модель процесса формирования общественного мнения была построена Г. Хакеном в его работе «Синергетика». Здесь главной трудностью был выбор макроскопических переменных, описывающих общество. Г. Хакен взял довольно простой пример. Он использовал в качестве параметров порядка число индивидуумов с соответствующими мнениями – за (+) и минус (-). Тогда формирование общественного мнения описывалось изменением этих чисел. При отсутствии внешних воздействий оказались возможными два результата. Вследствие частых перемен точек зрения получается одноцентровое распределение мнений в коллективе, а при значительной устойчивости связей между индивидуумами формируются два противоположных мнения, соответствующих состоянию поляризации общества. Эта модель позволяет качественно объяснить неустойчивые ситуации, когда характеристика общественного состояния, зависящая от связи индивидуумов, приближается к критическому значению (точке бифуркации).

Синергетика и экономика. Как уже говорилось, самоорганизующиеся системы – это открытые системы, свободно обменивающиеся с внешней средой и другими системами энергией, материальными потоками и информацией. В случае **рынка – это свободное движение капитала, рабочей силы и товара**. Целенаправленная деятельность субъектов – участников процесса в условиях внешних воздействий и конкуренции делает систему асимметричной и неравновесной, т.е. уводит ее от состояния равновесия (максимума энтропии).

Кооперация и конкуренция фирм являются самоорганизующимися процессами. При синергетическом моделировании рынка как самоорганизующейся системы с целью максимизации прибыли приходится решать дифференциальные балансовые уравнения, применять компьютерные системы обработки информации, новые информационные технологии.

В неравновесных системах, помимо знания балансовых уравнений, встает задача формализации и учета отношения порядка и беспорядка (соответственно, энтропии и негэнтропии). Эта проблема не так проста. Рынок выступает здесь в качестве индикатора, быстро обнаруживая неходовые товары, производство которых нерентабельно и ведет к росту энтропии.

Высококачественные товары, пользующиеся большим спросом и производящиеся в большем объеме (работает положительная обратная связь), напротив, увеличивают негэнтропию, порядок, так как ускоряются процессы производства и обмена, повышается занятость, полнее удовлетворяются потребности общества, растет жизненный уровень людей. Через некоторое время по мере расширения выпуска происходит насыщение рынка этим товаром, наступает момент равновесия между спросом и предложением, но конкурирующие фирмы уже освоили к этому времени новые изделия, поставили на рынок новые товары, с более высокими качествами. Товарно-денежные отношения снова активизируются. И когда производителей достаточно много, новые предложения поступают непрерывно. Так поддерживается неравновесность рынка и эффективность функционирования экономической системы.

Эволюция в социальных и гуманитарных системах. Между социально-культурной эволюцией и эволюцией биологической существует определенное сходство. Многие ученые характеризуют социальную эволюцию как продолжение биологической эволюции другими средствами. Сама культура при этом мощным средством приспособления к реальности. Однако сходство не означает тождества, и если рассматривать социально-культурную эволюцию как продолжение биологической эволюции, необходимо учитывать тот факт, что процессы самоорганизации при этом значительно усложняются, а сама эволюция приобретает качественно отличный характер. В частности, в живой природе эволюция происходит путем генетической передачи наследственной информации от родителей к потомкам. В социально-экономической и культурной эволюции непосредственный опыт, приобретенный людьми в процессе приспособления к изменениям окружающей среды, не передается по наследству.

В обществе существуют свои методы и средства передачи накопленного опыта (индивидуального, социального). Это традиции, религия, искусство, системы образования и т.п. Традиции относятся к наиболее устойчивому явлению, присущему тому или иному народу или группе. Лауреат Нобелевской премии Ф. Хайек помещает их между инстинктом и разумом. Традиции сыграли решающую роль в становлении порядка в человеческой деятельности и формировании цивилизации. Традиции придают социальной эволюции более ускоренный характер по сравнению с биологической. Вместе с тем между биологической и социальной эволюцией нет непроходимой пропасти – они связаны между собой определенными свойствами, присущими как животным, так и человеку. Важнейшим

из них является способность к подражанию. Уже у высших животных эта способность является существенным фактором приспособления к изменениям ОС. Многие ученые считают, что именно обучение путем подражания в сочетании с трудовой деятельностью привело в действие высокоэффективный механизм социально-культурной эволюции.

Синергетические координаты для описания эволюции. Спираль развития. Явления развития можно рассматривать как борьбу двух противоположных тенденций: организации и дезорганизации. При этом удобно их рассматривать в связи с понятием энтропии. Понятие энтропии в настоящее время выходит за рамки ее термодинамической трактовки (мера рассеяния тепловой энергии в замкнутой термодинамической системе – Клаузиус, 1952 г. и мера вероятности состояния замкнутой термодинамической системы – Больцман). На рубеже 20-30- годов Сциллард, Шеннон применили понятие энтропии к информационным системам в качестве меры вероятности информационных систем. Во второй половине 20-го века в работах Э. Шредингера понятие энтропии еще более расширилось – до понимания ее как меры дезорганизации систем любой природы. Эта мера простирается от максимальной энтропии ( $S=1$ ), т.е. хаоса, до «исчезновения» энтропии ( $S=0$ ), соответствующего наивысшему уровню порядка (см. рис.3). Н. Винер отождествлял количество информации с отрицательной энтропией (негэнтропией).

С помощью энтропии стало возможным оценивать количественно такие понятия, как «хаос» и «порядок». Информация и энтропия связаны потому, что они характеризуют реальную действительность с точки зрения упорядоченности и хаоса (информация – мера упорядоченности, энтропия – мера хаоса). С этой точки зрения в нашем обществе, в экономике в настоящее время довольно энтропия велика. Нарастание энтропии в обществе имеет множество проявлений. Это рост преступности, нарастание числа аварий и катастроф, низкая производительность, износ технологического оборудования и т.п.

Альтернативность и взаимосвязь понятий энтропии и информации выражаются в формуле:

$$S+J=1 \text{ (const)}$$

Если система эволюционирует в направлении упорядоченности, то ее энтропия уменьшается. Но это требует целенаправленных усилий, внесения информации, т.е. управления. Н. Винер писал: «Мы плывем вверх по течению, борясь с огромным потоком дезорганизованности, которая в соответствии со II законом термодинамики стремится все свести к тепловой смерти: Человек всю жизнь борется с энтропией, гася ее извлечением из окружающей среды отрицательной энтропии – информации» (по [3])

Таким образом, явления развития удобно рассматривать в координатах, связанных с понятиями энтропии и информации (негэнтропии). Это позволяет наглядно представить мысленную (концептуальную) модель процессов самоорганизации в виде сужающейся спирали, где по оси абсцисс откладывается энтропия, а по оси ординат – некоторый «параметр прогресса» Р.

Пусть имеются два подобных события на соседних витках спирали. Эти события соответствуют "узловым" моментам процессов развития, имеющим ярко выраженный скачкообразный характер, например, смена поколений ЭВМ и т.п. Интервал времени между двумя событиями А1 и А2 обозначим А1А2.

Энтропия, по мере накопления информации, убывает по направлению от периферии к центру, что соответствует прогрессу, т.е. возрастанию уровня организации объекта в процессе его развития. Характерными особенностями спирали развития являются следующие:

увеличение «параметра прогресса» от витка к витку:  $P_n > P_{n-1}$ ;

уменьшение доли элиминируемого, т.е. «отрицаемого», отбрасываемого витка; (по мере развития все меньше ненужного, «неправильного» приходится отбрасывать – это проявляется, в частности, при построении новых научных теорий):  $dH_n < dH_{n+1}$ ;

сокращение интервалов времени между скачками:  $t_2 < t_1$ .

Подобная модель самоорганизации может быть применена к биологическим, социальным, экономическим, культурным и др. системам. Главное здесь – возрастание уровня организации, связанное с уменьшением неопределенности по мере накопления информации. Так из биологии известно, что число принципиально возможных одноклеточных организмов намного больше того, что есть на самом деле. Низших биологических форм много, а Человек – один (сходящаяся спираль). Процесс написания студентом курсовой или дипломной работы тоже можно представить как движение от максимальной начальной до минимальной конечной энтропии. Высокая неопределенность в начале выполнения задания по мере работы над ним (работа с литературой, эскизы, блок-схемы, расчеты) уменьшается и достигает минимума к моменту оформления и защиты.

Развитие не всегда имеет восходящий характер. Возможны локальные возрастания энтропии, «обратные скачки». Возрастанию энтропии соответствуют участки  $j_1$  и  $j_2$ . Например, экономическим формациям присущи как восходящие, так и нисходящие линии развития. Пока производственные отношения данной формации более или менее соответствуют уровню производительных сил, последние развиваются ускоренно, по восходящей линии. Когда же устоявшиеся производственные отношения начинают тормозить продолжающийся рост производительных сил, наступает застойная или даже нисходящая стадия в развитии формации, что подводит общество к революционной ситуации, к новому скачку в развитии, происходящему в окрестностях точки бифуркации.

Подводя итог рассмотренным теоретическим положениям и примерам, выделим следующие условия и положения самоорганизации систем.

1. Система должна быть открытой, диссипативной и находиться вдали от термодинамического равновесия.
2. Если в случае закрытых систем самоорганизация (эволюция) ведет к росту энтропии и беспорядка, то в случае открытых систем происходит возникновение и усиление порядка через флуктуации. Именно флуктуации приводят в этом случае к «расшатыванию» старого порядка и возникновению нового. Энтропия падает, количество информации (негэнтропия растет).
3. Управление процессами и сохранение динамического равновесия систем основано на принципе обратной связи, когда на основе полученных обратных сигналов система возвращается в исходное состояние. Самоорганизация открытых систем опирается на принцип положительной обратной связи, согласно которому изменения, появляющиеся в системе, не устраняются, а наоборот, накапливаются и усиливаются, что приводит к возникновению нового порядка и структуры.
4. Система должна обладать достаточным количеством взаимодействующих между собой элементов и, следовательно, иметь некоторые критические размеры. В противном случае коллективное поведение элементов системы может не проявиться (самоорганизация не наступает).
5. Чем выше в своем эволюционном развитии находится система, тем более сложными и многочисленными будут факторы, которые влияют на ее самоорганизацию.