

Понятие информации и энтропии оказались весьма полезными для характеристики свойств детерминированного хаоса. При этом информация отвечает за порядок системы, а энтропия – за царящей в ней беспорядок. В этой лекции мы рассмотрим роль энтропии и информации в описании поведения диссипативных структур и динамического хаоса. Начнём мы с анализа различных способов введения меры измерения количества информации, их положительные и отрицательные стороны, связь с изменением информации в системе, а кончим одним замечанием ко всему курсу лекций.

Теперь, после того, как мы познакомились с разными видами информации, имеет смысл вернуться к рассмотрению меры информации и проанализировать их более подробно.

## 1. МЕРЫ ИНФОРМАЦИИ

Информация может пониматься и интерпретироваться в различных проблемах, предметных областях по-разному. Поэтому имеются различные подходы к определению измерения информации и различные способы введения меры количества информации. Количество информации - числовая величина, адекватно характеризующая актуализируемую информацию по разнообразию, сложности, структурированности (упорядоченности), определенности, выбору состояний отображаемой системы. Если рассматривается некоторая система, которая может принимать одно из  $n$  возможных состояний, то актуальной задачей является задача оценки этого выбора, исхода. Такой оценкой может стать мера информации (события). Мера - непрерывная действительная неотрицательная функция, определенная на множестве событий и являющаяся аддитивной (мера суммы равна сумме мер). Меры могут быть статические и динамические, в зависимости от того, какую информацию они позволяют оценивать: статическую (оценка сообщений без учета ресурсов и формы актуализации) или динамическую (оценка также и затрат ресурсов для актуализации информации).

### 1.1 Подходы к измерению количества информации

При реализации информационных процессов всегда происходит перенос информации в пространстве и времени от источника информации к приемнику. При этом для передачи информации используют различные знаки или символы, например естественного или искусственного (формального) языка, позволяющие выразить её в форме сообщения.

С точки зрения семиотики (*semeion* - знак, признак) - науки, занимающейся исследованием свойств знаков и знаковых систем сообщение, может изучаться на трех уровнях:

- **синтаксическом**, где рассматриваются внутренние свойства сообщений, т. е. отношения между знаками, отражающие структуру данной знаковой системы.
- **семантическом**, где анализируются отношения между знаками и обозначаемыми ими предметами, действиями, качествами, т. е. смысловое содержание сообщения, его отношение к источнику информации;
- **прагматическом**, где рассматриваются отношения между сообщением и получателем, т. е. потребительское содержание сообщения, его отношение к получателю.

Таким образом, проблемы передачи информации тоже разделяют на три уровня: синтаксический, семантический и прагматический.

Синтаксический уровень связан с чисто техническими проблемами совершенствования методов передачи сообщений и их сигналов, т.е. с задачами доставки получателю сообщений. При этом инженеры полностью абстрагируются от смыслового содержания сообщений и их целевого предназначения, учитывая такие параметры, как тип носителя, способ представления информации, скорость передачи и обработки, размеры кодов представления информации и т.д. Информацию здесь отождествляют с данными, поскольку смысловая сторона не имеет значения.

Проблемы семантического уровня связаны с формализацией и учётом смысла передаваемой информации. На данном уровне анализируются те сведения, которые отражает информация, выявляется смысл, содержание информации, осуществляется её обобщение. Проблемы этого уровня чрезвычайно сложны, так как смысловое содержание информации больше зависит от получателя, чем от семантики сообщения, представленного на каком-либо языке. На данном уровне анализируются сведения, которые отражает информация, выявляется смысл информации, выявляется содержание информации.

На прагматическом уровне интересуют последствия от получения и использования данной информации потребителем. Проблемы этого уровня связаны с определением ценности и полезности информации для потребителя. Основная сложность здесь состоит в том, что ценность, полезность

информации может быть совершенно различной для различных получателей и, кроме того, она зависит от ряда факторов, таких, например, как своевременность ее доставки и использования.

Современная теория информации исследует в основном проблемы синтаксического уровня. Она опирается на понятие «количество информации», которое никак не отражает ни смысла, ни важности передаваемых сообщений. В связи с этим иногда говорят, что теория информации находится на синтаксическом уровне.

Для каждого из рассмотренных выше уровней проблем передачи информации существуют свои подходы к измерению количества информации и свои меры информации. Различают соответственно меры информации синтаксического уровня, семантического уровня и прагматического уровня. Остановимся лишь на мерах информации синтаксического уровня.

Количественная оценка информации синтаксического уровня не связана с содержательной стороной информации, а оперирует с обезличенной информацией, не выражающей смыслового отношения к объекту. В связи с этим данная мера даёт возможность оценки информационных потоков в таких разных по своей природе объектах, как системы связи, вычислительные машины, системы управления, нервная система живого организма и т. п. Для измерения информации на синтаксическом уровне вводятся два параметра: объем информации (данных) -  $V$  (объемный подход) и количество информации -  $I$  (вероятностный подход).

Часто приходится иметь дело с явлениями, исход которых неоднозначен и зависит от факторов, которые мы не знаем или не можем учесть. Например – определение пола будущего ребёнка, результат бросания игральной кости и пр. События, о которых нельзя сказать произойдут они или нет, пока не будет осуществлен эксперимент, называются случайными. Раздел математики, в котором строится понятийный и математический аппарат для описания случайных событий, называется теорией вероятности.

Осуществление некоторого комплекса условий (отдельный повтор случайного события) называется опытом, а интересующий нас исход этого опыта – благоприятным событием. Тогда, если  $N$  – общее число опытов, а  $N_A$  – количество благоприятных исходов случайного события  $A$ , то отношение  $N/N_A$  называется относительной частотой появления события  $A$ . В разных сериях, значение частоты может оказаться различным. Действительно, например, в серии из трёх опытов по бросанию монеты может 2 раза выпасть орёл и 1 раз решётка. Если благоприятным событием считать выпадение орла, то частота получается равно  $2/3$ . В другой серии она может быть равно 0 или 1 или  $1/3$ . Однако, оказывается, что при увеличении количества опытов значение относительной частоты всё меньше и меньше отклоняется от некоторой константы. Скачки могут быть, но все реже и реже. Наличие этой константы называется статистической устойчивостью частот, а сама константа вероятностью случайного события  $A$ . В случае, если все исходы опыта конечны и равновероятны, то их вероятность равна  $P=1/n$ , где  $n$  – число возможных исходов.

Пример. Вероятность выпадения орла при бросании монеты –  $1/2$ ; вероятность вытянуть из урны красный шар (при условии, что там три шара – красный, синий, белый) –  $1/3$ .

Итак, при работе со случайными событиями, есть некоторая неопределенность. Введём в рассмотрение численную величину, измеряющую неопределенность опыта.

**Энтропия** – мера неопределенности опыта, в котором проявляются случайные события. Обозначим её  $H$ .

Очевидно, что величины  $H$  и  $n$  (число возможных исходов опыта) связаны функциональной зависимостью:  $H=f(n)$ , то есть мера неопределенности есть функция числа исходов.

Некоторые свойства этой функции:

1.  $f(1)=0$ , так как при  $n=1$  исход не является случайным и неопределенность отсутствует.
2.  $f(n)$  возрастает с ростом  $n$ , так как чем больше возможных исходов, тем труднее предсказать результат, и, следовательно, больше неопределенность.
3. если  $\alpha$  и  $\beta$  два независимых опыта с количеством равновероятных исходов  $n_\alpha$  и  $n_\beta$ , то мера их суммарной неопределенности равна сумме мер неопределенности каждого из опытов:

$$f(n_\alpha, n_\beta) = f(n_\alpha) + f(n_\beta)$$

Всем трём этим свойствам удовлетворяет единственная функция –  $\log(n)$ . То есть за меру неопределенности опыта с  $n$  равновероятными исходами можно принять число  $\log(n)$ . Вопрос – по какому основанию? В силу известной формулы  $\log_b n = \log_a n / \log_a b$  выбор основания значения не имеет, следовательно, можно взять в качестве основания логарифма 2. Таким образом:

$$H = \log_2 n$$

Это формула Хартли.

Преобразовывая, получим:  $2^H = n$

Если исходы опыта не равновероятны, справедлива формула Шеннона:  $h = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \left( \frac{1}{p_i} \right)$ , где  $p_i$  – вероятность  $i$ -того исхода.

Какова же связь энтропии с информацией?

Из определения энтропии следует, что энтропия – числовая характеристика, отражающая ту степень неопределенности, которая исчезает после проведения опыта, т. е. ПОСЛЕ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ. Именно после проведения опыта мы получаем определённую информацию. Энтропия опыта равна той информации, которую мы получаем в результате его осуществления. Информация  $I$  – содержание сообщения, понижающего неопределенность некоторого опыта с неоднозначным исходом; убыль связанной с ним энтропии является количественной мерой информации. Если  $H_1$  – начальная энтропия (до проведения опыта),  $H_2$  – энтропия после проведения опыта, то информация

$$I = H_1 - H_2 = \log_2 n_1 - \log_2 n_2 = \log_2 (n_1/n_2).$$

В случае, когда получен конкретный результат,  $H_2 = 0$ , количество полученной информации совпадает с начальной энтропией и подсчитывается по формуле Хартли.

Итак, мы ввели меру неопределенности – энтропию и показали, что начальная энтропия (или убыль энтропии) равна количеству полученной в результате опыта информации. Важным при введении какой-либо величины является вопрос о том, что принимать за единицу ее измерения. Очевидно, значение  $H$  будет равно 1 при  $n=2$ . Иначе говоря, в качестве единицы принимается количество информации, связанное с проведением опыта, состоящего в получении одного из двух равновероятных исходов (например, бросание монеты). Такая единица количества информации называется «бит».

Вероятностный подход учитывает ценность информации для конкретного получателя (действительно, ведь речь идет о благоприятных (для кого-то!!) событиях).

Пример. Определим количество информации, связанное с появлением каждого символа в сообщениях, записанных на русском языке. Будем считать, что русский алфавит состоит из 33 букв и знака «пробел». По формуле Хартли:  $H = \log_2 34 = 5$  бит (здесь считаем, что появление каждой буквы равновероятно), а по формуле Шеннона (для неравновероятных исходов) 4,72 бит. Значение, полученное по формуле Хартли – максимальное количество информации, которое может приходиться на один знак.

При реализации информационных процессов информация передается в виде сообщения, представляющего собой совокупность символов какого-либо алфавита. При этом каждый новый символ в сообщении увеличивает количество информации, представленной последовательностью символов данного алфавита. Если теперь количество информации, содержащейся в сообщении из одного символа, принять за единицу, то объем информации (данных)  $V$  в любом другом сообщении будет равен количеству символов (разрядов) в этом сообщении. Так как одна и та же информация может быть представлена многими разными способами (с использованием разных алфавитов), то и единица измерения информации (данных) соответственно будет меняться. В компьютерной технике наименьшей единицей измерения информации является 1 бит. Объем информации, записанной двоичными знаками (0 и 1) в памяти компьютера или на внешнем носителе информации подсчитывается просто по количеству требуемых для такой записи двоичных символов. Например, восьмиразрядный двоичный код 11001011 имеет объем данных  $V = 8$  бит. В современной вычислительной технике наряду с минимальной единицей измерения данных «бит» широко используется укрупнённая единица измерения «байт», равная 8 бит.

Следует обратить внимание, что в системе измерения двоичной (компьютерной) информации, в отличие от метрической системы, единицы с приставками «кило», «мега» и т. д. получаются путем умножения основной единицы не на  $10^3 = 1000$ ,  $10^6 = 1000\,000$  и т. д., а на  $2^{10}$ ,  $2^{20}$  и т. д.

## 1.2 Ценность информации

Ценность информации является величиной, имеющей различные значения для различных людей, в соответствии с их способностью понять информацию и использовать её в дальнейшем в различных областях своей деятельности. Информация ценна, поскольку она способствует достижению поставленной цели. Информация может иметь различную ценность, если критерием оценки избрать её использование для различных целей. Вопросом особой значимости является отношение информации и знания, первичности одного к другому. Понятия «знание» и «информация» часто отождествляются. В то же время знание рассматривают как высшую форму отражения действительности, а информацию – как особое фундаментальное свойство материи. Говоря, что объект (или субъект)  $A$  отражает объект  $B$ , имеют в виду определенные изменения в  $A$ , которые соответствуют определенным изменениям в  $B$  и вызываются ими. Говоря об информации, подразумевают прежде всего особый способ взаимодействия, через который

осуществляется передача изменения от  $B$  к  $A$  в процессе отражения, - способ, который реализуется через поток сигналов, идущих от объекта к субъекту и особым образом в нём преобразуемых.

Уровень сложности и формы информации зависят от качественных характеристик объекта и субъекта, от типа передающихся сигналов, которые реализуются в форме языковых знаковых систем. Говоря о знании, мы имеем в виду именно высший уровень информации, функционирующий в человеческом обществе. При этом в качестве знания выступает не вся информация, идущая от  $B$  и воспринимаемая  $A$ , а лишь та её часть, которая преобразована и переработана  $A$  (в данном случае - человеком) особым образом. В процессе переработки информация должна приобрести знаковую форму и выразиться в ней с помощью других знаний, хранящихся в памяти; она должна получить смысл и значение. Следовательно, знание - это всегда информация, но не всякая информация - знание. В превращении информации в знание участвует целый ряд закономерностей, включающих знание в систему общественных связей, в культурный контекст определенной эпохи. Благодаря этому знание становится достоянием общества, а не только отдельных индивидов.

В то же время информация - не просто результат отражения, не просто данные или знание. Только взаимодействуя с потребителем, данные или знание приобретают характер сообщения, сведения, т. е. становится информацией. Информация - это данные, находящиеся в постоянном обороте и движении, это знания, которые собираются, хранятся, перерабатываются, передаются и используются развивающейся системой. Знание только тогда приобретает качество информации, когда оно действует или может действовать как основа регуляции, управления. Информация есть только там, где есть движение, преобразование, использование и управление.

Относительность информации проявляется в том, что системы с различным уровнем организации извлекают из одного и того же источника различную, но всегда соответствующую своему уровню информацию. Положение об извлечении и использовании информации для построения определенных программ поведения и действия - принципиально. Именно оно является основой функциональной концепции информации, связывая последнюю с процессами управления. Информация является не субстанциональным свойством всей материи, а функциональным свойством систем управления, связью управляющих систем с управляемыми.

Между информацией и её значением (смыслом) можно установить чёткое различие. Информация - неотъемлемая данность любых систем, взаимодействующих с человеком. Значение (смысл) достигается только тогда, когда обретенная информация помещается в определенный контекст, то есть информация становится значимой лишь после анализа, сравнения и интеграции с другой, уже существующей в воспринимающей системе информацией.

### **1.3 Информация и сложность системы**

В данном курсе лекций мы уже говорили об алгоритмической энтропии и информации, как меры сложности систем и степени её хаотически. Остановимся ещё раз на подходе Колмогорова к созданию меры информации.

Акад. А.Н. Колмогоровым дано определение сложности, исходя из чего сложность объекта - есть минимальное число двоичных знаков, содержащих информацию об объекте, достаточную для его воспроизведения (декодирования). Другими словами, сложность - это выраженная в битах длина самой экономичной программы, порождающей сообщение об объекте. Для того, чтобы установить, что данная последовательность чисел сложна (т.е. случайна), следует доказать, что не существует более короткой программы, порождающей эту последовательность. Согласно теореме Гёделя такое утверждение недоказуемо, доказательство требует системы большей сложности. Важно, что творческие создания человека, произведения литературы и искусства не могут быть представлены сокращенной программой. В этом смысле они уникальны, т.е. незаменимы. Сложно то, что незаменимо. Невозможность дальнейшей минимизации программы, генерирующей сложное сообщение, означает её незаменимость.

Давайте сыграем в такую игру. Один загадывает число, скажем, в пределах от единицы до тысячи, а второй в попытках угадать это число задает вопросы, ответом на которые может быть только «да» или «нет». Цель игры — угадать задуманное число, задав минимальное количество вопросов. Хорошо известна стратегия этой игры, позволяющая, во всяком случае, не проиграть. Следуя подобной стратегии, вы должны мысленно разделить интервал, в пределах которого загадываются числа, пополам и задать вопрос: — Задуманное вами число больше пятисот двенадцати? Полезно брать не точно половину интервала, т. е. не число «пятьсот», а ближайшую к этому числу целую степень двойки (и все остальные называемые в вопросах числа - это также целые степени двойки 'либо суммы таких степеней). В случае положительного ответа делим пополам верхнюю половину интервала и задаём следующий вопрос:— Задуманное вами число больше семисот шестидесяти восьми? В случае же отрицательного ответа на

первый вопрос пополам делится нижняя половина интервала и соответственно следующий вопрос формулируется так: — Задуманное вами число больше двухсот пятидесяти шести? Каким бы ни было задуманное число, если только оно находится в пределах интервала от нуля до тысячи, отгадать его можно, следуя такой стратегии, не более чем за десять вопросов. В общем случае минимальное количество вопросов равно целому, ближайшему (сверху) к двоичному логарифму от ширины интервала, в пределах которого загадываются числа. Спрашивается, сколько информации получим, узнав задуманное число? Академик А. Колмогоров предложил принять за количество информации, содержащейся в некотором сообщении, минимальное количество ответов типа «да» — «нет», которые надо получить, чтобы угадать это сообщение. Существенную роль играет слово «минимальное». Всегда существует стратегия, позволяющая угадать сообщение, задавая вопросы, ответами на которые могут быть только «да» или «нет», причём среди многих таких стратегий (алгоритмов) существует одна, обладающая тем свойством, что при её использовании задается минимальное количество вопросов.

Особенность алгоритмического подхода в теории информации заключается в том, что используемая в нём количественная мера информации предполагает наличие двух множеств. Можно говорить лишь о количестве информации, содержащейся в одном множестве относительно другого. Информация выступает, следовательно, в форме отношения между множествами. Количество её определяется как минимальная длина программы, однозначно преобразующая одно множество в другое. На первый взгляд между алгоритмической и энтропийной трактовками информации нет ничего общего. Однако можно провести между ними определенную параллель.

Выбор одной альтернативы из некоторого множества возможных предполагает, что в нашем распоряжении имеется алгоритм, который переводит исходное множество альтернатив в множество, содержащее одну альтернативу. Именно по такой схеме осуществляется работа оптимизационных программ. Исходным множеством альтернатив в этом случае является так называемое допустимое множество (область оптимизации). Задача заключается в том, чтобы из допустимого множества выбрать множество оптимальных решений в смысле того или иного критерия. Если программа сложна и содержит большое число, команд (или операций), то можно говорить, что в данном случае оптимум относительно допустимого множества содержит большое количество информации. Вместо этого можно говорить о большом количестве информации, переработанной программой.

В рамках энтропийного подхода для оценки количества информации потребовалось бы 1) определение мощности допустимого множества и 2) определение вероятности того, что элемент из этого множества является оптимальным (для каждого элемента). Если для простоты предположить конечность допустимого множества и равновероятность альтернативных вариантов (за отсутствием других гипотез), то количество информации будет равно логарифму от числа элементов допустимого множества. Это даёт представление о сложности алгоритма, если учесть, что для общего случая дискретной оптимизационной задачи алгоритм решения близок к алгоритму прямого перебора.

Существуют задачи, где алгоритмический подход к информации обладает рядом преимуществ перед энтропийным, например, в области современных теорий управления, где он хорошо отображает особенности постановок управленческих задач. С общеметодологической точки зрения алгоритмический подход согласуется с «разнообразностной» трактовкой информации. Он близок и к истолкованию информации как «снятой» неопределённости, т.к. работу алгоритма можно рассматривать как процесс снятия неопределённости. При этом неопределённость может быть представлена множеством альтернатив в виде набора возможных решений. Существование некоторой области возможностей играет важную роль в выяснении природы информации.

## 1.4 Энтропия динамической системы

**Динамическая система** — математическая абстракция, предназначенная для описания и изучения систем, эволюционирующих с течением времени. Примером могут служить механические системы (движущиеся группы тел) или физические процессы. Реальным физическим системам, моделируемым математическим понятием «динамической системы», приписывается важное свойство *детерминированности*: зная состояние системы в начальный момент времени, мы можем однозначно предсказать все её дальнейшее поведение. Фазовым пространством динамической системы называется множество всех её возможных состояний в фиксированный момент времени. Обычно состояние системы задается некоторым набором чисел (фазовых координат) и представляет собой область в многомерном пространстве или многообразие. Эволюция системы представляется как движение точки фазового пространства. Кривая, описываемая этой точкой называется фазовой кривой или фазовой траекторией. Каждая точка фазового пространства задаёт состояние *всей* системы.

Существуют два вида энтропии, которые могут служить мерой хаоса: топологическая энтропия и метрическая энтропия (или энтропия Колмогорова–Синяя)

**Энтропия Колмогорова–Синяя** — энтропия динамической системы.

**Энтропия Колмогорова–Синяя**, степень генерации информации динамической системой, сохраняющей меру

**К-энтропия** – мера хаотичности и неустойчивости, она связана со средней скоростью разбегания близких в начальный момент траекторий.

Понятие энтропии используется не только для описания случайных (вероятностных) процессов, энтропию (и информацию) можно приспособить и для описания строго детерминированных процессов, например, процессов в классической механике.

В классической механике энтропия используется как характеристика динамического хаоса в системах с неустойчивостью движения – экспоненциальной расходимостью близких в начальный момент траекторий. Количественной мерой неустойчивости таких систем служит энтропия Крылова-Колмогорова-Синяя, или К-энтропия. Для широкого класса систем К-энтропия выражается через положительные показатели Ляпунова по формуле:

$$K_s = \sum_i \lambda_i$$

Если положительные показатели Ляпунова отсутствуют и, следовательно, движение устойчиво, то К-энтропия равна нулю.

Другое применение К-энтропии – оценка энтропии Вселенной.

**Энтропия вселенной** – величина, характеризующая степень неупорядоченности и тепловое состояние Вселенной.

Количественно оценить полную энтропию Вселенной как термодинамическую энтропию Клаузиуса нельзя, поскольку энтропия не является термодинамической системой. Из-за того, что гравитационное взаимодействие является дальнодействующим и неэкранируемым, гравитационная энергия Вселенной не пропорциональна её объёму. Полная энергия Вселенной тоже не пропорциональна объёму и поэтому не есть аддитивная величина. Кроме того, Вселенная согласно закону Хаббла расширяется, т.е. нестационарна. Оба эти факта означают, что Вселенная не удовлетворяет исходным аксиомам термодинамики об аддитивности энергии и существовании термодинамического равновесия. Поэтому Вселенная, как целое, не характеризуется какой-либо одной температурой. Оценить энтропию Вселенной, как энтропию Больцмана  $k \ln W$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $W$  – число возможных микросостояний системы, также нельзя, поскольку Вселенная не «пробегает» все возможные состояния, а эволюционирует от одного состояния к другому. Иными словами, для всей Вселенной нельзя ввести статистический ансамбль Гиббса, т.к. нельзя пренебречь гравитационным взаимодействием членов такого ансамбля.

Энтропию Вселенной, как целого можно оценить, используя понятие энтропии Колмогорова-Синяя. К-энтропия является мерой хаотичности и неустойчивости, она связана со средней скоростью разбегания близких в начальный момент траекторий. Причём К-энтропия тем больше, чем быстрее разбегаются траектории, т.е. чем сильнее неустойчивость траекторий и хаотичней система. Однородное распределение вещества гравитационно неустойчиво; развитие неустойчивости приводит к образованию отдельных сгустков. При гравитационном сжатии сгустка гравитационная энергия вещества переходит в тепловую энергию движения частиц. Поэтому образование звёзд и галактик из равномерно распределённого вещества переходит в тепловую энергию частиц. Поэтому образование звёзд и галактик из равномерно распределённого вещества сопровождается ростом К-энтропии. Таким образом, в рамках этого предположения для Вселенной справедлив закон роста энтропии, хотя она и не является термодинамической системой и в ходе эволюции становится структурно более сложной.

## 2. ИНФОРМАЦИЯ И ЭНТРОПИЯ - МЕРЫ ПОРЯДКА И ХАОСА

### 2.1 Порядок, беспорядок и хаос

Мерой беспорядка, хаоса для некоторой системы является её энтропия, тогда как информация (антиэнтропия) является мерой упорядоченности и сложности системы. По мере увеличения сложности системы величина энтропии уменьшается, и величина информации увеличивается. Процесс увеличения информации характерен для открытых, обменивающихся веществом и энергией с окружающей средой, саморазвивающихся систем живой природы (белковых молекул, организмов, популяций животных и так далее). В физике информация рассматривается как антиэнтропия или энтропия с обратным знаком.

Основы математического аппарата, подходящего для описания беспорядка (хаоса), были заложены ещё в конце XIX века, но получили широкое развитие лишь в наше время. Этому сильно способствовала отечественная математическая школа академика А.Н.Колмогорова (В.И.Арнольд, Я.Г.Синай и др.), а области прикладных исследований большая заслуга принадлежит школам А.В.Гапонова-Грехова и А.С.Монина. В настоящее время формируется новый весьма универсальный подход к анализу нелинейных систем, основанный на классических результатах математиков и физиков.

Если система хаотична, можно ли узнать, насколько она хаотична? Мерой хаоса служит «энтропия» движения, которая, грубо говоря, равна средней скорости растяжения и складывания или средней скорости, с которой «производится» информация.

**Порядок** - гармоничное, ожидаемое, предсказуемое состояние или расположение чего-либо.

**Порядок в физике** - упорядоченное в пространстве расположение объектов, часто атомов или молекул. Порядок - состояние системы, с достаточной степенью точности инвариантное относительно некоторых определённых сдвигов в пространстве.

**Беспорядок термодинамической системы** - количество возможностей конфигурирования системы.

**Ха́ос** (*χαῖνω*, «раскрываться, разверзаться») - категория космогонии, первичное состояние Вселенной, бесформенная совокупность материи и пространства (в противоположность порядку). В обыденном смысле **хаос** понимают как беспорядок, неразбериху, смешение.

**Динамический хаос** - явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминистическими законами.

Порядок в физической, экологической, экономической и любой другой системе может быть двух видов: равновесный и неравновесный. При равновесном порядке, когда система находится в равновесии со своим окружением, параметры, которые ее характеризуют (температура, давление) одинаковы с теми, которые характеризуют окружающую среду; при неравновесном порядке они различны. На первый взгляд равновесный порядок более «стабилен», чем неравновесный. В самой природе равновесного порядка заложено противодействие любым возмущениям состояния системы (такое «упрямство» в термодинамике называется принципом Ле-Шателье). Способность возвращаться к исходному состоянию – неперенное свойство так называемых саморегулирующихся систем.

Природа неравновесного порядка другая. Этот вид порядка – искусственного происхождения и существует только при условии подачи энергии (или питательной массы) извне. Действительно, ведь неравновесность – неодинаковость параметров системы и среды – вызывает потоки тепла и массы. Поэтому для поддержания порядка требуется компенсировать потери, к которым приводят необратимые «выравнивающие» потоки. Другими словами, нужны энергетические затраты. Если подпитку энергией прекратить, то система «свалится» в состояние равновесного порядка. Потери, связанные с перетеканием тепла или массы, называются диссипативными, поскольку их физическая сущность – рассеяние энергии, как говорят, её диссипация. Создается парадоксальная ситуация: в условиях диссипации, традиционно воспринимаемой как проявление распада структур, их неустойчивости, возникает порядок!

Физика – наука количественная, и, чтобы получить конкретный результат, нужно перейти от общих рассуждений к уравнениям и математическим образам. Самым полезным из таких образов, с помощью которого можно изобразить ход процесса, состояние системы и степень её организованности, оказалось фазовое пространство. Координатами в этом пространстве служат различные параметры, характеризующие рассматриваемую систему. В механике, например, это положения и скорости всех точек, движение которых мы рассматриваем, и поэтому в современной аналитической механике фазовое пространство, пожалуй, основное понятие.

Фазовое пространство – абстрактное математическое пространство, координатами в котором служат положения и скорости всех точек физической системы, и оно удобно для наглядного описания её эволюции. Например, движение шарика на абсолютно упругой резинке, в которой нет трения, полностью определяется начальной скоростью и положением шарика (начальными условиями). Каждому мгновенному состоянию такого осциллятора – колебательной системы – отвечает точка на фазовой плоскости. Когда шарик колеблется вверх и вниз без трения, эта точка описывает замкнутую кривую, а если колебания постепенно затухают, то фазовая траектория сходится по спирали к предельной точке, соответствующей остановке шарика. Эта точка неподвижна: если шарик подтолкнуть, его фазовая кривая вернется в ту же точку, которая как бы притягивает все близлежащие траектории. Поэтому её называют неподвижной притягивающей точкой, или фокусом. Такая притягивающая точка – простейший тип аттрактора.

**Фазовое пространство** - в классической механике и статистической физике, многомерное пространство всех обобщённых координат  $q_i$  и обобщённых импульсов  $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) механической системы с  $N$  степенями свободы. Таким образом, Ф. п. имеет размерность  $2N$  и может быть описано с помощью ортогональной системы координат с  $2N$  осями соответственно числу обобщённых координат и импульсов. Состояние системы изображается в фазовом пространстве точкой с координатами  $q_1, p_1, \dots, q_N, p_N$ , а изменение состояния системы во времени – движением точки вдоль линии, называемой фазовой траекторией. Для фазового пространства можно ввести понятие фазового объёма и др. понятия геометрии многих измерений. Понятие фазового пространства – основное для классической статистической механики, изучающей функции распределения системы многих частиц. Методы фазового пространства успешно применяются также в теории нелинейных колебаний.

Важно, что взглянув на «фазовый портрет» физической системы, мы можем сразу понять, находится она в состоянии равновесного или неравновесного порядка. Более того, несмотря на их разную физическую сущность, эти два вида порядка можно изобразить на одной и той же диаграмме в виде чётких точек, линий и фигур. Можно также нарисовать диаграмму перехода из одного упорядоченного состояния в другое. А всегда ли геометрические образы на фазовой диаграмме будут четкими? Оказывается, что существует класс явлений, противоположных порядку как по физической сущности, так и по характеру изображения на фазовой диаграмме. Их образы размыты, нечетки, носят случайный (стохастический) характер. Явления, порождающие такие образы, называются хаотическими.

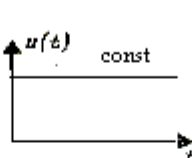
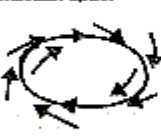
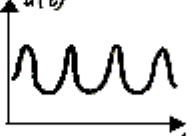
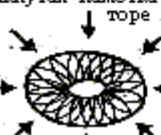
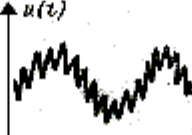
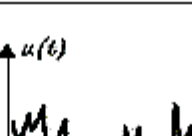
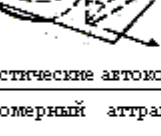
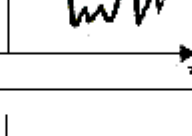
| Тип аттрактора                                                                                                                                               | Сигнал                                                                              | Энтропия   | Размерность                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|
| <p>Устойчивое равновесие</p>                                                |    | $H \sim 0$ | $D = 0$<br>$D = 0$                                        |
| <p>Предельный цикл</p>                                                      |    | $H = 0$    | $D = 1$                                                   |
| <p>Периодические автоколебания<br/>Незамкнутая намотка на двойном торе</p>  |    | $H = 0$    | $D = 2$                                                   |
| <p>Многопериодические колебания<br/>Странный аттрактор</p>                |  | $H > 0$    | $D = 2,06$                                                |
| <p>Стохастические автоколебания<br/>Многомерный аттрактор</p>             |  | $H > 0$    | $D \geq 1$<br>$D \rightarrow n$<br>$n \rightarrow \infty$ |
| <p>Многомерный хаос</p>                                                   |                                                                                     |            |                                                           |

Рис. 1. Размерность и энтропия при различных видах движения.

Причиной появления хаоса является неустойчивость по отношению к начальным условиям и параметрам: малое изменение начального условия со временем приводит к сколь угодно большим изменениям динамики системы. По аналогии явлению нерегулярного (хаотического) движения в нелинейных системах был присвоен термин *динамический*, или *детерминированный*, хаос. Наблюдаемое хаотическое поведение возникает не из-за внешних источников шума, не из-за большого числа степеней свободы и не из-за неопределенности, связанной с квантовой механикой. Оно порождается собственной динамикой нелинейной детерминированной системы. В фазовом пространстве системы такому поведению соответствует странный аттрактор. **Аттрактор** (*притягиватель*) - множество траекторий в фазовом пространстве, к которым притягиваются все остальные траектории из некоторой окрестности аттрактора, называемой также *бассейном притяжения*. Термин «странный» используется, чтобы подчеркнуть необычность свойств аттрактора, соответствующего хаотическому поведению. Причиной нерегулярности поведения является свойство нелинейных систем экспоненциально быстро разводить первоначально близкие траектории в ограниченной области фазового пространства. Предсказать поведения траекторий

хаотических систем на длительное время невозможно, поскольку чувствительность к начальным условиям высока, а начальные условия можно задать лишь с конечной точностью.

**Аттрактор** — множество состояний (точнее — точек фазового пространства) динамической системы, к которому она стремится с течением времени. Наиболее простыми вариантами аттрактора являются притягивающая неподвижная точка (к примеру, в задаче о маятнике с трением о воздух) и периодическая траектория (пример — самовозбуждающиеся колебания в контуре с положительной обратной связью), однако бывают и значительно более сложные примеры.

**Странный аттрактор** — аттрактор, не являющийся регулярным. Среди странных аттракторов часто встречаются хаотические аттракторы, в которых прогнозирование траектории, попавшей в аттрактор, затруднено, поскольку малая неточность в начальных данных через некоторое время может привести к сильному расхождению прогноза с реальной траекторией. Непредсказуемость траектории в детерминированных динамических системах называют динамическим хаосом, отличая его от *стохастического хаоса*, возникающего в стохастических динамических системах. Это явление также называют эффектом бабочки, подразумевая возможность преобразования слабых турбулентных потоков воздуха, вызванных взмахом крыльев бабочки в одной точке планеты в мощное торнадо на другой её стороне вследствие многократного их усиления в атмосфере за некоторое время.

Важно, что хаотические системы порождают информацию. Дело в том, что прогноз движения вдоль траекторий становится все более и более неопределенным по мере удаления от начальных условий. С точки зрения теории информации это означает, что система сама порождает информацию и скорость создания информации тем выше, чем больше хаотичность системы. Поскольку система создает информацию, то её содержат и траектории системы. Информация запоминается и хранится в виде траекторий динамической системы и обладает свойствами ассоциативности. Эта идея возникла и получила развитие при попытках понять, чем может быть полезен хаос в обработке информации живыми системами.

Первым сильную неустойчивость систем с упругими столкновениями отметил Н.С.Крылов. Бильярдные системы общего типа, характеризующиеся свойством экспоненциальной неустойчивости траектории («бильярды Синая»), введены и изучены Я.Г.Синаем. Существуют два вида энтропии, которые могут служить мерой хаоса: топологическая энтропия и метрическая энтропия (или энтропия Колмогорова–Синая).

**Показатель Ляпунова** — мера динамики аттрактора. Каждая размерность имеет показатель Ляпунова. Положительный показатель измеряет чувствительность зависимости от начальных условий, или то, насколько наши предсказания могут отклоняться исходя из различных оценок начальных условий. Другой подход к оценке показателей Ляпунова состоит в том, что они характеризуют потерю предсказательной способности при попытке заглянуть в будущее. Странные аттракторы характеризуются, по меньшей мере, одним положительным показателем. Отрицательный показатель измеряет схождение точек. Точечные аттракторы характеризуются всеми отрицательными переменными.

## 2.2 Диссипативные структуры

С самых ранних дней становления биологии философы и ученые заметили, что живые формы самыми на первый взгляд загадочными способами сочетают устойчивость структуры с гибкостью изменений: «Материя циркулирует, энергия рассеивается». Единственным отходом экосистемы — тепловая энергия дыхания: она рассеивается в атмосфере и непрерывно пополняется через фотосинтез за счет солнечного излучения. Понимание живых структур как открытых систем было важным новым подходом, который, однако, не решил загадку сосуществования структуры и изменения, порядка и рассеяния, пока Илья Пригожин не сформулировал свою теорию диссипативных структур. Как Бергаланфи объединил понятия потока и равновесия для описания открытых систем, так и Пригожин объединил «диссипацию» (рассеяние) и «структуру», чтобы выразить две кажущиеся противоречивыми тенденции, которые сосуществуют во всех живых системах. Однако концепция диссипативных структур Пригожина идет гораздо дальше теории открытых систем, поскольку включает также представление о точках неустойчивости, в которых могут возникать новые структуры и новые формы порядка. Теория Пригожина связывает главные характеристики живых форм в последовательную концептуальную и математическую модель, которая предполагает радикальный пересмотр многих фундаментальных идей, касающихся структуры — переносит акцент от устойчивости к неустойчивости, от порядка к неупорядоченности, от равновесия к неравновесным состояниям, от бытия к становлению.

Ключ к пониманию диссипативных структур лежит в осознании того, что они поддерживают себя в устойчивом состоянии, далеко от равновесия. Живой организм характеризуется непрерывным потоком и изменениями в обмене веществ, включающем тысячи химических реакций. Химическое и тепловое равновесие наступает тогда, когда все эти процессы прекращаются. Другими словами, организм в состоянии равновесия — это мертвый организм. Живые организмы непрерывно поддерживают себя в далеком от равновесия состоянии, которое, по сути, есть состояние жизни. Сильно отличаясь от равновесия, это

состояние, тем не менее, сохраняет устойчивость в течение продолжительных периодов времени, что означает поддержание одной общей структуры, несмотря на непрекращающийся поток и изменение компонентов.

Пригожин понял, что классическая термодинамика - первая наука, трактующая сложные системы, - не подходит для описания далеких от равновесия систем из-за линейной природы её математической структуры. Система всегда развивается в сторону стационарного состояния, в котором генерация энтропии (или беспорядка) сведена к минимуму. Система минимизирует свои потоки, функционируя предельно близко к состоянию равновесия. В этом диапазоне потоковые процессы описываются линейными уравнениями. Чем дальше от равновесия, тем потоки становятся сильнее, увеличивается выработка энтропии, и тогда система больше не стремится к равновесию. Наоборот, здесь уже могут встретиться неустойчивости, ведущие к новым формам порядка, которые отодвигают систему все дальше и дальше от состояния равновесия, т.е. вдали от равновесия диссипативные структуры могут развиваться в формы все более возрастающей сложности. Вдали от равновесия потоковые процессы в системе взаимосвязаны через многочисленные петли обратной связи, а соответствующие математические уравнения нелинейны. Чем дальше диссипативная структура от равновесия, тем выше степень сложности и нелинейности описывающих её математических уравнений.

Учитывая критическую связь между неравновесным состоянием и нелинейностью, Пригожий разработал нелинейную термодинамику для далеких от равновесия систем, используя для этого аппарат теории динамических систем - новую математику сложных систем. Он показал, что системы в линейном диапазоне «склонны забывать свои начальные условия». За пределами линейного диапазона ситуация совершенно другая. Нелинейные уравнения имеют больше чем одно решение; чем выше степень нелинейности, тем больше решений. Это означает, что новые ситуации могут возникать в любой момент: система в этом случае попадает в точку бифуркации, где может отклониться в совершенно другое состояние. Поведение системы в точке бифуркации (т.е. по какому из нескольких возможных направлений она пойдёт) зависит от предыдущей истории системы. В нелинейном диапазоне начальные условия уже «не забываются». Поведение далекой от равновесия диссипативной структуры не подчиняется ни одному из универсальных законов; оно уникально для данной системы. Вблизи точки равновесия мы находим повторяющиеся феномены и универсальные законы. По мере удаления от равновесия, мы движемся от универсального к уникальному, в направлении богатства и разнообразия. Это, конечно, хорошо известная характеристика жизни.

Наличие точек бифуркации, в которых система может пойти по любому из нескольких различных направлений, предполагает, что неопределенность является ещё одной характеристикой теории Пригожина. В точке бифуркации система может сделать «выбор» между несколькими возможными направлениями, или состояниями. Какое направление она выберет, будет зависеть от истории системы и различных внешних условий и никогда не может быть предсказано. В каждой точке бифуркации существует неустранимый элемент случайности. Неопределенность в точках бифуркации представляет собой один из двух типов непредсказуемости в теории диссипативных структур. Другой тип, характерный также для теории хаоса, обусловлен высокой степенью нелинейности уравнений и проявляется даже тогда, когда бифуркации отсутствуют. Из-за многократных петель обратной связи итераций - мельчайшая погрешность в вычислениях, вызванная практической необходимостью определенного округления цифр, неизбежно значительно повышает степень неопределенности, делая предсказания невозможными. Как неопределенность в точках бифуркации, так и неопределенность «хаотического типа» из-за повторяющихся итераций предполагают, что поведение диссипативной структуры может быть предсказано лишь на короткий промежуток времени. После этого системная траектория ускользает от нас.

По Пригожину, признание неопределенности как ключевой характеристики естественных феноменов является частью серьезного пересмотра научной концептуальности. Тесно связан с этим концептуальный сдвиг и в научных представлениях о необратимости и времени.

В механистической парадигме ньютоновской науки мир рассматривался как полностью причинный и детерминированный. Все, что происходило, имело определенную причину и приводило к определенному следствию. Будущее любой части системы, равно как и ее прошлое, в принципе, могло быть рассчитано с абсолютной определенностью, если состояние этой системы в любой данный момент времени известно во всех подробностях.

В этом лапласианском детерминизме не делается различия между прошлым и будущим. И то и другое заложено в настоящем состоянии мира и в ньютоновых уравнениях движения. Все процессы здесь строго обратимы. Будущее и прошлое чередуются, здесь нет места истории, новаторству или творчеству.

Необратимые эффекты (например, трение) отмечались в классической ньютоновской физике, но ими всегда пренебрегали. В XIX столетии ситуация изменилась решительным образом. С изобретением тепловых двигателей необратимость рассеяния энергии при трении, вязкость (сопротивление жидкости течению) и тепловые потери оказались в центре внимания новой науки термодинамики, которая выдвинула идею стрелы времени. В это же время геологи, биологи, философы и поэты начали размышлять над изменением, ростом, развитием и эволюцией.

В классической термодинамике необратимость, при всей своей важности как понятия, всегда ассоциировалась с рассеянием энергии и потерями. Пригожий фундаментально изменил такой подход в своей теории диссипативных структур, показав, что в живых системах, функционирующих вдали от равновесия, необратимые процессы играют конструктивную и важную роль.

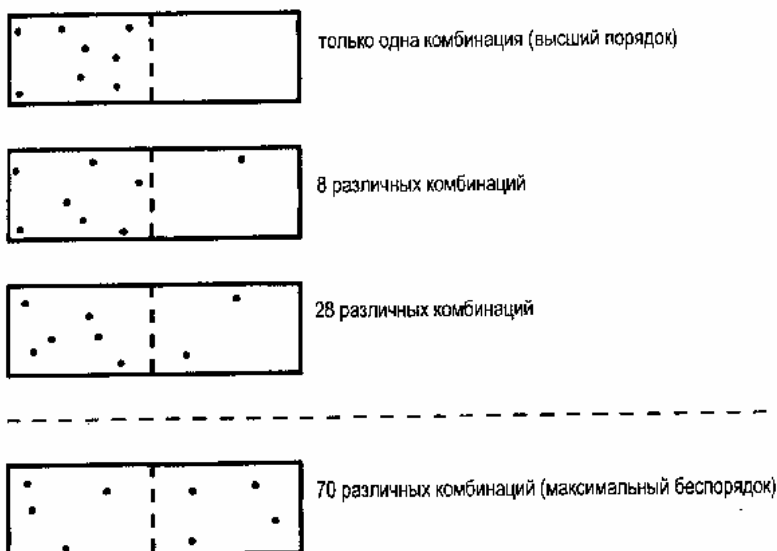
Химические реакции - базовые процессы жизни - являются примером необратимых процессов. В ньютоновском мире не может быть ни химии, ни жизни. Теория Пригожина показывает, как каталитические петли - особого типа химические процессы, исключительно важные для живых организмов, - приводят к состояниям неустойчивости через многократную усиливающую обратную связь и как в последовательных точках бифуркации возникают структуры постоянно нарастающей сложности. «Необратимость, - заключает Пригожий, - есть механизм извлечения порядка из хаоса».

Теория Пригожина означает переход от детерминированных, обратимых процессов к неопределенным, необратимым.

Стрела времени, как она представляется в классической термодинамике, не указывает на возрастающий порядок, она направлена в противоположную сторону. Согласно второму закону термодинамики, физические феномены проявляют тенденцию к движению от порядка к беспорядку, в сторону непрерывно возрастающей энтропии. Пригожин разрешил парадокс двух противоречивых взглядов на эволюцию - физического и биологического: один представляет идею глохнущего мотора, другой описывает мир, эволюционирующий в сторону возрастающего порядка и сложности. По его теории второй закон термодинамики всё ещё верен, но взаимосвязь между энтропией и беспорядком уже видится в новом свете. Согласно второму закону термодинамики, энтропия нарастает, по мере того как продолжается тепловой процесс; рассеянная энергия никогда не может быть восстановлена, а направление в сторону непрерывно нарастающей энтропии определяет стрелу времени. Но что конкретно вызывает эту необратимость? В ньютоновской физике эффектами трения пренебрегали, считая их не существенными. Но при желании эти эффекты можно учесть и в ньютоновской системе: можно использовать ньютоновы законы движения для описания рассеяния энергии на молекулярном уровне в форме каскадов столкновений. Каждое из этих столкновений - обратимое событие, поэтому нет ничего невозможного в том, чтобы запустить этот процесс в обратном направлении. Тогда получается, что рассеяние энергии, необратимое на макроскопическом уровне и отвечающее второму закону и обычному опыту, состоит из полностью обратимых событий на микроскопическом уровне. Где же здесь, в таком случае, вкрадывается необратимость? На этот вопрос ответил Больцман, который вложил новый смысл в понятие энтропии и установил связь между энтропией и порядком.

Представьте, что мы наполняем мешок двумя видами песка - нижнюю половину чёрным песком, а верхнюю белым. Это состояние высокого порядка; здесь существует лишь одна возможная комплексия. Затем мы встряхиваем мешок, чтобы смешать частицы песка. По мере того как белый и чёрный песок смешиваются все больше и больше, число возможных комплексий возрастает, а вместе с ней и степень

беспорядка, пока мы не получим однородную смесь, состоящую из серого песка, - и максимальный беспорядок.



**Рис. 2.** Мысленный эксперимент Больцмана

Введя такое определение порядка, Больцман смог анализировать поведение молекул в газе. Используя статистические методы, разработанные Максвеллом для описания беспорядочного движения молекул, Больцман отметил, что число возможных комплексий любого состояния является мерой вероятности того, что газ окажется в этом состоянии. Чем больше комплексий

существует для определенной комбинации, тем больше вероятность того, что это состояние установится в газе при беспорядочном движении молекул. Число возможных комплексов для определенной комбинации молекул измеряет как степень порядка этого состояния, так и вероятность его установления. Чем выше число комплексов, тем больше беспорядок и выше вероятность того, что газ окажется в этом состоянии. Так Больцман пришел к выводу, что движение от порядка к беспорядку есть движение от менее вероятного состояния к более вероятному. Выражая энтропию и беспорядок через число комплексов, он ввел определение энтропии на языке вероятностных представлений.

Согласно Больцману, не существует физического закона, который запрещал бы движение от беспорядка к порядку, но, в силу беспорядочного движения молекул, такое направление весьма маловероятно. Чем больше молекул, тем выше вероятность движения от порядка к беспорядку, а при огромном количестве частиц в газе, эта вероятность практически превращается в определенность. Когда вы трясете мешок с белым и черным песком, вы можете наблюдать, как два типа песчинок разделяются прямо-таки волшебным способом, образуя высокоупорядоченное состояние полного разделения. Но вам придется трясти мешок в течение нескольких миллионов лет, чтобы это событие произошло.

На языке Больцмана второй закон термодинамики означает, что любая закрытая система стремится к максимально вероятному состоянию, которое представляет собой состояние максимального беспорядка. Как только равновесие достигнуто, система стремится его покинуть. Временами беспорядочное движение молекул может создавать различные состояния, но они близки к равновесию и существуют лишь в течение коротких периодов времени. Другими словами, система просто флуктуирует (беспорядочно колеблется) вокруг состояния теплового равновесия.

Классическая термодинамика пригодна для описания феноменов в состоянии равновесия или близком к равновесию. Пригожинская теория диссипативных структур применима к далеким от равновесия термодинамическим феноменам, когда молекулы находятся не в беспорядочном движении, но взаимосвязаны через многочисленные петли обратной связи, описываемые нелинейными уравнениями. В этих уравнениях уже не доминируют точечные аттракторы, а это означает, что система более не стремится к равновесию. Диссипативная структура поддерживает себя вдали от равновесия и может даже уходить все дальше и дальше от него через последовательные бифуркации. В точках бифуркации состояния высшего порядка (в больцмановском смысле) могут возникать спонтанно. Тем не менее, это не противоречит второму закону термодинамики. Полная энтропия системы продолжает увеличиваться, но это увеличение энтропии неэквивалентно сплошному увеличению беспорядка. В живом мире порядок и беспорядок всегда создаются одновременно.

По Пригожину, диссипативные структуры - это островки порядка в море беспорядка, поддерживающие и даже повышающие свой порядок за счёт увеличения беспорядка в окружающей среде. Например, живые организмы забирают упорядоченные структуры (пищу) из окружающей среды, используют их как ресурсы для своих метаболических процессов и рассеивают их как структуры низшего порядка (отходы). Как говорит Пригожин, «порядок парит в беспорядке»; при этом общая энтропия продолжает возрастать в соответствии со вторым законом термодинамики. Это представление о порядке и беспорядке радикально переворачивает традиционные научные понятия. В классическом понимании порядок эквивалентен равновесию, как, например, в кристаллах и других статических структурах, а беспорядок - неравновесным состояниям, таким как вихри. Новая наука сложных систем, черпающая вдохновение из паутины жизни, показывает, что неравновесное состояние - это источник порядка. Турбулентные потоки воды и воздуха, выглядя хаотическими, на самом деле обладают высокой организацией и сложными паттернами, в которых вихри делятся снова и снова во все более мелких масштабах. В живых системах порядок, возникающий из неравновесных состояний, ещё более очевиден; он выражает себя в богатстве, разнообразии и красоте жизни вокруг нас. Во всем живом мире хаос преобразуется в порядок.

Точки неустойчивости, в которых происходят непредсказуемые драматические события, где спонтанно возникает порядок и разворачивается скрытая ранее сложность, представляют самый замечательный аспект теории диссипативных структур. До Пригожина единственным типом неустойчивости, который изучался, была турбулентность, вызываемая внутренним трением текущей жидкости или газа. Было показано, что любой поток воды или воздуха становится турбулентным при достаточно высокой скорости - т. е. при достаточно большом «удалении» от равновесия (неподвижного состояния). Исследования Пригожина показали, что для химических реакций это неверно. Химическая неустойчивость не возникает автоматически вдали от равновесия. Для этого необходимы каталитические петли: они подводят систему к точке неустойчивости через многократную усиливающую (положительную) обратную связь. В этих процессах объединяются два различных феномена - химические реакции и диффузия

(физический поток молекул, вызванный разностью концентраций). Описывающие их нелинейные уравнения называются уравнениями реакционной диффузии. Они формируют математическую основу теории, позволяющую описывать большой диапазон типов поведения. Точка бифуркации - порог устойчивости, где диссипативная структура может либо разрушиться, либо прорваться к одному из нескольких новых состояний порядка. Что на самом деле происходит в этой критической точке, зависит от предыдущей истории системы. В зависимости от того, каким путём она достигла точки неустойчивости, она направится по той или иной ветке после точки бифуркации. Эта важная роль истории диссипативной структуры в критических точках её развития, обнаруженная даже в простых химических колебаниях является физическим началом характерной для всех живых систем связи между структурой и историей. Живая структура всегда является записью своего предыдущего развития. В точке бифуркации диссипативная структура проявляет исключительную чувствительность к малейшим флуктуациям в окружающей среде. Незначительное случайное отклонение, часто называемое «шумом», может определить выбор направления. Поскольку все живые системы существуют в непрерывно флуктуирующей среде и поскольку невозможно узнать, какое отклонение произойдет в точке бифуркации в «тот самый» момент, мы никогда не можем предсказать будущее направление развития системы. Таким образом, все детерминистские описания оказываются несостоятельными, когда диссипативная структура проходит точку бифуркации. Ничтожные отклонения в окружающей среде определяют выбор ветви, по которой эта структура последует. Именно эти случайные отклонения приводят к возникновению новых форм порядка. Пригожин ввёл описательный термин порядок через флуктуации. Уравнения его теории - детерминистские уравнения. Они управляют поведением системы на отрезках между точками бифуркации; что касается точек неустойчивости, то здесь решающими оказываются флуктуации - небольшие случайные отклонения. «Процессы самоорганизации в далеких от равновесия условиях соответствуют тонкому взаимодействию между случайностью и необходимостью, между флуктуациями и детерминистскими законами».

Теория Пригожина включает несколько тесно взаимосвязанных идей. Описание диссипативных структур, которые существуют вдали от равновесия, требует нелинейного математического аппарата, способного моделировать множественные взаимосвязанные циклы обратной связи. В живых организмах, это каталитические циклы (т. е. нелинейные, необратимые химические процессы), которые приводят к точкам неустойчивости через повторяющуюся самоусиливающую обратную связь. Когда диссипативная структура достигает такой точки неустойчивости, называемой точкой бифуркации, в теории появляется элемент неопределенности. В точке бифуркации поведению системы свойственна непредсказуемость. В частности, здесь могут спонтанно возникнуть новые структуры высшего порядка и сложности. Самоорганизация, спонтанное возникновение порядка, служит результатом комплексного эффекта неравновесия, необратимости, циклов обратной связи и неустойчивости. Ключевые характеристики диссипативных структур - чувствительность к малым изменениям в окружающей среде, важность предыдущей истории в критических точках выбора, неопределенность и непредсказуемость будущего - революционные концепции с точки зрения классической науки, однако служат частью человеческого опыта. Поскольку диссипативные структуры - базовые структуры всех живых систем, включая и человеческие существа, это не должно вызывать удивления.

Вместо того чтобы быть машиной, природа в целом оказывается более подобной человеку - непредсказуемая, чувствительная к окружающему миру, подверженная влиянию малейших отклонений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя материал, собранный для никому не нужного курса лекций, сделаю одно замечание.

За время своего существования наука информатика накопила четыре типа энтропий: это - физическая (в двух ипостасях – термодинамическая и статистическая), техническая, смысловая и алгоритмическая (есть и более экзотические энтропии, но до них у меня руки не дошли) энтропии. Каждой из этих энтропий можно сопоставить свою информацию. При этом информация выступает, как мера порядка системы, а энтропия – её беспорядка. Являются ли все перечисленные виды информации проявлениями одной и той же сущности, есть ли между ними хоть что-то общее, или это понятия абсолютно разные, лишь по недоразумению названные одним и тем же именем – науке неизвестно. Оптимисты полагают, что не пройдет и сто лет, как мы с этим разберемся.

Флаг вам в руки, ребята!