

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем

Ю.Л. Климонтович

Вводятся основные понятия нового научного междисциплинарного направления "Физика открытых систем". Рассматривается один из критериев относительной степени упорядоченности неравновесных состояний этих систем. На его основе вводится понятие "нормы хаотичности" (или "нормы упорядоченности") и выявляется отличие процессов деградации и самоорганизации. Кратко обсуждаются возможности использования методов физики открытых систем в экономике, социологии и физиологии.

PACS numbers: 05.45.+b, 87.10.+e, 87.80.+s

Содержание

1. Экскурс в историю физики открытых систем (1231).
 2. Физика открытых систем. Диссипативные структуры. Синергетика (1232).
 3. Деградация и самоорганизация в процессах эволюции (1233).
 4. Физический и динамический хаос. Неравновесные фазовые переходы (1234).
 5. Динамическое и статистическое описание сложных движений (1235).
 6. Конструктивная роль динамической неустойчивости движения (1235).
 7. Критерий относительной степени упорядоченности состояний открытых систем. S-теорема (1236).
 8. Является ли турбулентное движение более хаотическим, чем ламинарное? (1237).
 9. Определение относительной степени упорядоченности по экспериментальным данным (1238).
 10. Диагностика медико-биологических объектов по S-теореме (1239).
 11. Что же такое самоорганизация? (1239).
 12. Физика открытых систем для социологов и экономистов (1241).
 13. Заключительные замечания (1241).
- Список литературы (1243).

1. Экскурс в историю физики открытых систем

Возникновение научного направления "Физика открытых систем" было подготовлено трудами многих выдающихся исследователей девятнадцатого столетия. В их числе физик Людвиг Больцман, математики Анри Пуан-

каре и Александр Ляпунов и, конечно, биолог Чарльз Дарвин.

Людвиг Больцман назвал XIX столетие веком Дарвина. Он полагал тем самым, что теория эволюции Дарвина, основанная на принципе естественного отбора, является наиболее значительным открытием прошлого века. Такой вывод может показаться неожиданным. Действительно, XIX век очень богат великими открытиями в естествознании, в частности, в физике. Ведь XIX век — это век термодинамики, созданной в значительной мере трудами Сади Карно, Рудольфа Клаузиуса и Вильяма Томсона. Это век электромагнитной теории Майкла Фарадея и Джеймса Максвелла. В XIX веке были заложены и основы современной молекулярно-кинетической теории материи. Одним из ее основателей был сам Людвиг Больцман. Именно он предложил первое кинетическое уравнение для описания необратимых процессов в газах. Уравнение Больцмана и по сей день является одним из основных уравнений теории неравновесных процессов. Оно описывает, в частности, установление равновесного состояния в газе. Больцман ввел впервые и статистическое определение одной из основных характеристик термодинамики — энтропии. Именно он доказал знаменитую "H-теорему Больцмана", согласно которой в процессе установления равновесного состояния энтропия монотонно возрастает и остается постоянной при его достижении. Наконец, именно Больцман понял, что в замкнутых системах энтропия может служить мерой относительной степени хаотичности. И все же именно Больцман определил XIX век как век Дарвина. Тем самым на первое место он поставил принцип биологической эволюции [1].

На чем же основан такой вывод?

Главное, что определило такой выбор, — это удивительная научная интуиция Больцмана. Ведь во времена Больцмана не существовало каких-либо математических моделей биологической эволюции. Основным движущим фактором была уверенность Больцмана в том, что развитая им теория временной эволюции газа в замкнутой системе будет обобщена и на открытые системы. К

Ю.Л. Климонтович. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119899 Москва, Воробьевы горы, Россия
Тел. (095) 939-38-25. Факс (095) 143-85-47
E-mail: ylklim@hklim.phys.msu.ru

Статья поступила 17 апреля 1996 г.,
после доработки 19 сентября 1996 г.

числу последних относятся и все биологические объекты. Теория эволюции Дарвина была, таким образом, первым шагом в теории эволюции открытых систем. Больцман был одним из немногих в то время, кто понял важность этого "первого шага". Это и определило его оценку теории Дарвина как величайшего открытия XIX века.

Такую точку зрения едва ли в то время разделяли многие. Ведь и сама теория Больцмана вызывала возражения у большинства ученых того времени. Более того, вокруг теории Больцмана бушевали страсти. Среди оппонентов Больцмана был и величайший математик того времени Анри Пуанкаре — один из создателей качественной теории дифференциальных уравнений и теории динамических систем, которая базируется на уравнениях механики Ньютона. Он полностью отвергал теорию Больцмана.

Приведем для иллюстрации небольшой отрывок из книги И. Пригожина "От существующего к возникающему" [2]: "Пуанкаре в одной из своих работ открыто не рекомендовал изучать труды Больцмана на том основании, что посылки в рассуждениях Больцмана противоречат его, Пуанкаре, выводам!" А. Пуанкаре, основываясь на обратимых уравнениях механики, пришел к выводу, что теория необратимых процессов и механика несовместимы. Основанием служило, в частности, то, что в механике нет функции, играющей роль энтропии. Предполагалось, тем самым, что механика, которая основана на обратимых уравнениях движения, и теория необратимых процессов несовместимы.

Известно и другое высказывание А. Пуанкаре, приведенное в одной из статей И. Пригожина (сб. "Синергетика" [3]): "В этой связи забавно вспомнить слова Пуанкаре о том, что рекомендовать кому-либо прочесть работу Больцмана он не может, так как не может рекомендовать изучение доказательств, в которых выводы противоречат предпосылкам".

Как разительно отличается от оценки А. Пуанкаре оценка работ Людвиг Больцмана, данная представителем следующего поколения ученых, одним из основателей квантовой механики Эрвином Шрёдингером. На с. 161 той же книги Пригожина [2] читаем: "Его (Больцмана) направление мышления можно было бы назвать моей первой любовью. Никакие идеи не захватывали меня столь глубоко и вряд ли смогут захватить меня в будущем".

Таким образом, уже на пороге XX столетия стало ясно, что развитие теории неравновесных процессов в физических и биологических системах является одной из важнейших задач естествознания. Оказалось, однако, что от понимания важности проблемы до ее даже далеко неполного решения потребовалось почти целое столетие.

Первым принципиальным шагом в этом направлении была развита Альбертом Эйнштейном, Марианом Смолуховским и Полем Ланжевеном теория броуновского движения — хаотического движения малых, но все же макроскопических, частиц в жидкости. Оно впервые наблюдалось и было описано ботаником Робертом Броуном в 1827 году¹. Отсюда и название "броуновское

движение". Его причиной являются толчки со стороны молекул жидкости. Таким образом, система броуновских частиц представляет пример открытой системы.

По уравнению Больцмана средняя энергия частиц газа в процессе эволюции сохраняется. Это условие необходимо, чтобы в процессе эволюции к равновесному состоянию энтропия, а с ней и степень хаотичности, возрастали. В противоположность этому средняя энергия броуновских частиц в процессе эволюции к равновесному состоянию не сохраняет свое значение. По этой причине Н-теорема Больцмана для броуновских частиц уже не является справедливой. Заметим, что в процессе эволюции по уравнению Больцмана сохраняется не точное значение энергии, а лишь ее среднее значение. По этой причине возможны флуктуации энергии и, следовательно, система Больцмана, как и система броуновских частиц, является открытой.

Создание современной статистической теории открытых систем было подготовлено многими учеными. Мы уже отметили выдающуюся роль Людвиг Больцмана и Анри Пуанкаре — основоположников статистической и динамической теории открытых систем. Ведущую роль в современной теории играют математические работы А.М. Ляпунова — одного из создателей теории устойчивости движения, А.Н. Колмогорова об энтропии динамических систем (1957 г.); физиков Л.И. Мандельштама, А.А. Андропова, Н.С. Крылова, Я.Б. Зельдовича и многих других. К числу основоположников теории самоорганизации относится, несомненно, Владимир Иванович Вернадский — создатель учения о ноосфере (сфере разума).

Приступим теперь к изложению основного материала. По мере продвижения вперед будем делать дополнительные исторические замечания.

2. Физика открытых систем. Диссипативные структуры. Синергетика

Физика открытых систем — междисциплинарное научное направление. Для его характеристики можно привести краткий перечень ключевых слов и понятий: хаос и порядок; открытые системы; критерии относительной степени упорядоченности состояний открытых систем; норма хаотичности; деградация и самоорганизация; диагностика открытых систем; конструктивная роль динамической неустойчивости движения атомов; переход от обратимых уравнений к необратимым. Кинетическое и гидродинамическое описание неравновесных процессов с учетом структуры "сплошной среды"; описание на этой основе равновесных и неравновесных фазовых переходов; единое кинетическое описание ламинарных и турбулентных движений; квантовые открытые системы. Многие из этих понятий не являются, естественно, "новыми". Целью "Физики открытых систем" является,

Броуном экспериментов, поэтому многие исследователи наблюдали явление хаотического движения мелких частиц в жидкости до него, например голландские исследователи А. Левенгук, открывший микроорганизмы (1673–1677 гг.) или Жан Ингенхауз (Jan Ingenhousz), описавший движение размельченных частичек древесного угля на поверхности спирта. Заслуга Броуна состояла не в открытии самого факта хаотического движения суспензии мелких частиц, а в постановке специальных экспериментов и в первой попытке сформулировать постулаты этого движения. (Примеч. Г.Р. Иваницкого.)

¹ Весьма распространенное мнение, что "броуновские частицы" впервые наблюдались Р. Броуном, является ошибочным. Свойства системы линз давать увеличенное изображение предметов были известны еще в XVI веке, а вполне подходящий для лабораторных наблюдений микроскоп был создан почти за 200 лет до описанных

однако, развитие идей и методов единого описания этого широкого круга вопросов [4].

Открытые системы могут обмениваться с окружающими телами энергией, веществом и, что не менее важно, информацией. Будем рассматривать лишь макроскопические открытые системы. Они состоят из многих объектов, принимаемых за элементы структуры. Эти элементы могут быть микроскопическими, например атомы или молекулы в физических и химических системах. Элементы могут быть относительно малыми, но все же макроскопическими. Это, например, макромолекулы в полимерах, клетки в биологических структурах.

Благодаря сложности открытых систем в них возможно образование различного рода структур. Диссипация играет при образовании структур конструктивную роль. Это кажется, на первый взгляд, удивительным, так как понятие диссипации ассоциируется с затуханием различного рода движений, с рассеянием энергии, с потерей информации. Однако, и это чрезвычайно существенно, диссипация необходима для образования структур в открытых системах. Чтобы подчеркнуть это, Илья Пригожин ввел термин "*диссипативные структуры*". Это чрезвычайно емкое и точное название объединяет все виды структур: временные, пространственные и, наконец, наиболее общие пространственно-временные структуры. Примером последних могут служить автоволны [5].

Сложность открытых систем предопределяет широкие возможности для существования в них кооперативных явлений. С целью подчеркнуть роль коллектива при образовании диссипативных структур Герман Хакен ввел термин *синергетика* [6, 7], что означает — совместное действие. Цель синергетики [8] — выявление общих идей, общих методов и общих закономерностей в самых разных областях естествознания, а также социологии и даже лингвистики. Более того, в рамках синергетики происходит кооперирование различных специальных дисциплин. О широте "интересов" синергетики можно судить по серии книг "синергетика", которую выпускает издательство "Шпрингер". Недавно вышел 66-й том этой серии [9].

Синергетика родилась на базе термодинамики и статистической физики. Поэтому необходимо подчеркнуть, что в основе теории открытых систем лежат фундаментальные физические законы.

3. Дегградация и самоорганизация в процессах эволюции

Эволюция — это процесс изменения, развития в природе и обществе. Такое понятие является очень общим. В физических замкнутых системах эволюция во времени приводит к равновесному состоянию. Ему отвечает максимальное значение энтропии и, как мы увидим, максимальная степень хаотичности. В открытых же системах можно выделить два класса эволюционных процессов.

1) Временная эволюция к неравновесному стационарному состоянию.

2) Процесс эволюции через последовательность неравновесных стационарных состояний открытой системы. Последний происходит благодаря изменению так называемых *управляющих параметров*.

Теория эволюции Дарвина основана на принципе естественного отбора. При этом эволюция может вести

либо к дегградации, либо представлять собой процесс самоорганизации, в ходе которого возникают более сложные и более совершенные структуры. Можно ли ожидать, что самоорганизация является единственным результатом эволюции? Ответ на него, естественно, отрицательный, так как ни в физических, ни даже в биологических системах не заложено "внутреннее стремление" к самоорганизации. Тем самым эволюция может вести и к дегградации. Физическим примером служит эволюция газа к равновесному состоянию, которое согласно Больцману является наиболее хаотическим.

Таким образом, самоорганизация — лишь один из возможных путей эволюции. Для ответа на вопрос, по какому пути будет развиваться процесс, надо иметь *критерии самоорганизации*. При этом нет необходимости давать определения таких фундаментальных понятий как *деградация* и *самоорганизация*. Такие определения очень трудны и, что существенно, не являются однозначными. Более важным является сравнительный анализ относительной степени упорядоченности (или хаотичности) различных состояний рассматривается открытой системы. Только такой анализ может дать ответ на вопрос, является ли рассматриваемый в открытой системе процесс *самоорганизацией* или *деградацией*?

Мы уже использовали такие понятия, как хаос и порядок. Как же отличить порядок от хаоса?

Можно привести примеры, когда такое отличие представляется очевидным. Однако на примере сравнения ламинарных и турбулентных течений мы увидим, что кажущийся очевидный вывод может оказаться все же неправильным. Для получения более обоснованных ответов и нужны, как уже говорилось, количественные критерии относительной степени упорядоченности (или хаотичности) различных состояний открытых систем.

Результаты такого анализа объективны и дают дополнительную информацию, которая состоит в установлении некоторой "*нормы хаотичности*", а также в установлении отклонений от нормы (в ту или иную сторону) под влиянием тех или иных воздействий. В биологии это могут быть различные стрессы, которые и вызывают отклонения степени хаотичности от нормы. При этом отклонения и в ту, и в другую сторону могут означать "*болезнь*" и, следовательно, представлять собой процесс дегградации.

Таким образом, далеко не всегда констатация (по выбранному критерию) уменьшения степени хаотичности означает наличие самоорганизации и наоборот — увеличения степени хаотичности означает наличие дегградации. Такие выводы правомерны только в тех физических системах, когда за начало отсчета степени хаотичности можно принять состояние теплового равновесия. В такой открытой системе, как, например генератор электрических колебаний, равновесному состоянию, т.е. при нулевой обратной связи, отвечают тепловые колебания в электрическом контуре.

Поскольку нормальное функционирование организма возможно лишь при некоторой норме хаотичности, которая отвечает существенно неравновесному состоянию, то указанная выше точка отсчета от равновесного состояния здесь не существует. По этой причине в биологии, а также, конечно, в экономике и социологии объективная информация об изменении степени хаотичности еще недостаточна, чтобы делать вывод о наличии процесса самоорганизации или дегградации.

Здесь возможна, однако, другая классификация. Если удается установить для данной системы норму *хаотичности*, то отклонения в обе стороны можно рассматривать как "болезнь" и, следовательно, как деградацию. Далее можно контролировать выбор методики "лечения". Здесь снова вступает в игру критерий относительной степени упорядоченности. Если по этому критерию "лечение" приближает состояние открытой системы к норме, то имеет место процесс *самоорганизации*. В противном случае "лечение" вызывает дальнейшую *деградацию*.

Но каковы же критерии относительной степени упорядоченности? Что является относительной мерой порядка или беспорядка? Это очень сложные вопросы и ответы на них были получены совсем недавно.

Трудности введения относительной меры упорядоченности (или, напротив, хаотичности) открытых систем связаны, в первую очередь, с отсутствием четких определений самих исходных понятий: *хаос*, *порядок*, *деградация*, *самоорганизация*. Определения этих понятий, как уже отмечалось, являются в большой мере условными. Мы только что отметили, что далеко не всегда, особенно в биологии, а также социологии и экономике, переход к более хаотическому состоянию следует рассматривать как деградацию. Существенным является рассмотрение отклонений от нормы хаотичности.

В связи с изложенным полезно рассмотреть основные понятия более подробно. Это и откроет нам путь для формулировки критерия относительной степени упорядоченности, без которого сами понятия деградации и самоорганизации остаются, фактически, бессодержательными.

4. Физический и динамический хаос. Неравновесные фазовые переходы

Хаос и порядок — понятия, которые играли существенную роль уже в мировоззрении философов древности, в частности, представителей школы Платона. Не вдаваясь в детали, отметим лишь два сформулированных ими положения, которые сохраняют свое значение и по сей день.

По представлениям Платона и его учеников *хаос* — состояние материи, которое остается по мере устранения возможностей проявления ее свойств. С другой стороны, из хаоса возникает все, что составляет содержание мироздания, т.е. из хаоса может родиться *порядок* (см. [10]).

В физике понятия "хаос" и "хаотическое движение" являются фундаментальными, но все же недостаточно четко определенными. Действительно, согласно Больцману, наиболее хаотическим является движение в состоянии равновесия. Хаотическим, однако, называют и движения, далекие от равновесного. Это, например, "движения" в генераторах шума, предназначенных для подавления сигналов.

Хаотическим называют, как правило (см. [11–13]), и различного рода турбулентные движения в газах и жидкостях. Примером служит турбулентное движение в трубах. Оно возникает из ламинарного движения при достаточно большом перепаде давления на концах трубы. При этом представление о турбулентном движении как более хаотичном, чем ламинарное, кажется само собой разумеющимся. Такой вывод основан, однако, на

смешении понятий *сложности* и *хаотичности*. При наблюдении турбулентного движения проявляется именно сложность движения. Вопрос же о степени хаотичности требует дополнительного анализа и для количественных оценок необходимы соответствующие критерии [12].

В последние годы стало широко использоваться понятие "*динамический хаос*" для характеристики сложных движений в сравнительно простых динамических системах [14, 15]. Слово "динамический" означает, что отсутствуют источники флуктуаций — источники беспорядка.

По этой причине понятие "динамическая система" отвечает определенной идеализации. Более реальное хаотическое движение с учетом и случайных источников можно назвать "*физический хаос*". Его примером и является хаотическое движение атомов и молекул в состоянии равновесия.

Математическое понятие "динамический хаос" восходит к работам А. Пуанкаре и А.Н. Колмогорова. Исторически первый пример динамического хаоса был обнаружен в работе Эдварда Лоренца в 1963 году [16]. Он исследовал с помощью вычислительной машины решение уравнений, которые служат математической моделью конвективного движения в газах и жидкостях. Конвективное движение возникает благодаря совместному действию поля тяжести и градиента температуры, создаваемого внешним источником тепла. Речь идет, таким образом, об открытой системе.

Представим себе слой жидкости, который подогревается снизу. *Конвективное движение* выражается в том, что более нагретые элементы жидкости перемещаются вверх, а более холодные — вниз. Происходит, тем самым, передача тепла снизу вверх. При достаточно малых градиентах температуры перенос тепла определяется за счет теплопроводности. Это *молекулярный — неорганизованный процесс*. Он не сопровождается упорядоченным гидродинамическим движением, которое могло бы, подобно регулировке уличного движения, управлять переносом тепла.

Ситуация существенно меняется, когда градиент температуры превышает некоторое критическое значение. Изменение проявляется в том, что в жидкости возникает упорядоченное макроскопическое движение. Оно и называется конвективным. В результате происходит *саморегулировка теплового потока* — по одним каналам более нагретые элементы перемещаются вверх, а по другим более холодные элементы перемещаются вниз. Таким образом, распределение встречных тепловых потоков становится строго упорядоченным.

Эта ситуация напоминает регулировку встречных потоков при уличном движении. Есть, однако, и существенная разница. Действительно, регулировка уличного движения регламентируется правилами уличного движения. При конвективном же движении имеет место *процесс самоорганизации*. Задается лишь градиент температуры. Перестройка же движения происходит благодаря внутренним свойствам самой системы. Внешне результат этой перестройки проявляется в том, что на поверхности жидкости появляется диссипативная пространственная структура — *ячейки Бенара*.

Обычно внутри ячеек жидкость поднимается вверх, а по краям опускается вниз. Благодаря такой перестройке обеспечивается большая пропускная способность, чем

при молекулярном — неупорядоченном теплопереносе. Появление новой структуры можно рассматривать как *неравновесный фазовый переход*.

Другим примером неравновесного фазового перехода может служить возникновение когерентного электромагнитного излучения в квантовых оптических генераторах — лазерах.

5. Динамическое и статистическое описание сложных движений

В историческом введении мы отметили сколь драматичным было соперничество двух теорий *статистического и динамического описания неравновесных процессов*. Хотя в настоящее время "накал страстей" не столь велик, эти два направления и по сей день развиваются в значительной мере независимо. Необходимость их синтеза особенно остро ощущается в последние годы в связи, в первую очередь, с развитием *физики открытых систем*.

В чем же причина столь долгого противостояния этих двух фундаментальных научных направлений? Является ли такое независимое развитие оправданным?

Ответ на второй вопрос очевиден: их синтез необходим. Первый же вопрос не является столь простым. Ниже мы попытаемся дать на него ответ.

Выделим два класса систем: *динамические и стохастические* (или статистические). Такое разделение является условным, так как во многих случаях трудно провести различие между *динамическим и физическим хаосом*. Его, однако, можно провести на основе численного эксперимента. Это оправдано, поскольку практически все представляющие интерес математические модели не имеют аналитических решений.

В основу классификации можно положить *свойство воспроизводимости движения* по заданным начальным условиям. Тогда, по определению, к динамическим относятся воспроизводимые, а к стохастическим — невоспроизводимые по начальным данным движения в нелинейных диссипативных системах.

Естественно, что в реальном эксперименте, когда наличие шума неизбежно, все процессы в той или иной мере являются стохастическими. При численном же эксперименте возможно точное (при заданной разрядности компьютера) повторение начальных условий. Воспроизводимость решения зависит лишь от структуры математической модели. Если уравнения не содержат случайных источников, то процесс *воспроизводим* и, следовательно, движение является динамическим, хотя оно и может быть при этом очень сложным и, практически, *непредсказуемым*. В противном случае (при наличии тех или иных источников), когда движение невоспроизводимо по начальным данным, мы имеем дело, следовательно, со стохастическим движением.

При исследовании стохастических процессов путем численного эксперимента существенно, что источники случайных чисел в компьютерах построены по определенному алгоритму и являются поэтому фактически детерминированными. Они могут рассматриваться как случайные, если характерные времена повторения для них значительно больше характерных времен релаксации динамической системы.

Основной особенностью динамического хаоса служит динамическая неустойчивость движения. Она выражается в сильной (экспоненциальной) расходимости

близких в начальный момент траекторий. Следствием ее является *перемешивание траекторий*, наличие которого позволяет перейти от полного описания на основе уравнений движения всех частиц к более простым уравнениям для функций, сглаженных по объему перемешивания. Тем самым радикально меняется способ описания. Система частиц заменяется *сплошной средой* [4].

Особое место в установлении связи динамического и статистического описания сложных движений принадлежит очень рано ушедшему из жизни Николаю Сергеевичу Крылову. В его книге "Работы по обоснованию статистической физики", опубликованной посмертно в 1950 году [17], впервые поставлен вопрос о роли динамической неустойчивости и перемешивания в обосновании статистической физики.

6. Конструктивная роль динамической неустойчивости движения

В сравнительно простых динамических системах существуют чрезвычайно сложные движения, которые воспринимаются как хаотические. Это и дало основание для введения новых понятий: странный *аттрактор* и динамический (или детерминированный) хаос.

Слово "хаос" является, как правило, негативным как в физике и биологии, так, например, и в экономике. Это понятие, однако, как уже отмечалось выше, очень многогранно. Так жизнь невозможна как при полном хаосе, так и при полном порядке. Для нормального организма нужна некоторая *норма степени хаотичности*. Для ее определения и поддержания необходимы количественные оценки относительной степени хаотичности.

Если имеется возможность определения относительной степени хаотичности, то отпадает необходимость "навешивания" дополнительных определений к слову хаос. В связи с этим уместно поставить вопрос: является ли оправданным термин "динамический хаос"? Ведь он возник для характеристики сложных состояний, которые возникают в результате развития динамической неустойчивости — *экспоненциального расхождения траекторий* при малых изменениях начальных условий. Однако это название находится в определенном противоречии с тем фактом, что траектории, рассчитанные по динамическим уравнениям, являются воспроизводимыми по начальным данным при численном эксперименте. Более того, как мы сейчас покажем, динамическая неустойчивость может играть в физике открытых систем *конструктивную роль*.

Начнем с иллюстративного примера из социологии.

Представим себе, что происходит международная конференция. Предположим, что конференция подошла к концу. Примем это состояние за начальное. Рассмотрим два возможных варианта их дальнейшего движения.

1. Участники конференции и после ее окончания перемещаются вместе, не удаляясь друг от друга на значительные расстояния.

2. Участники разъезжаются по местам работы и жительства — "разбегаются экспоненциально". Иными словами, движение слушателей становится "динамически неустойчивым". Какой из этих двух вариантов движения в большей мере способствует использованию полученной на конференции новой информации?

Первый вариант полезен в определенной мере, так как позволяет продолжить обсуждение рассмотренных на конференции вопросов. Несомненно, вместе с тем, что лишь второй вариант движения, когда имеет место "динамическая неустойчивость" и имеет место "перемешивание" траекторий участников, в большей мере способствует прогрессу науки.

Этот пример демонстрирует, что динамическая неустойчивость движения и перемешивание могут и не вести к "хаосу", а играть *позитивную и конструктивную роль*.

Вернемся после этого иллюстративного примера к физической системе. Рассмотрим разреженный газ. С точки зрения механики для описания эволюции газа надо использовать систему уравнений для всех его атомов. Такая задача непосильна даже для самых мощных компьютеров. В чем же выход? Как же найти способ описания неравновесных процессов в газе — в системе, состоящей из огромного числа частиц? Решение такой задачи возможно именно благодаря конструктивной роли динамической неустойчивости движения атомов газа.

Благодаря динамической неустойчивости движения — экспоненциальному разбеганию траекторий, а также неконтролируемым внешним воздействиям [2, 18, 4, 19, 20], происходит перемешивание траекторий в фазовом пространстве. Это и открывает возможность для сглаживания по физически бесконечно малым масштабам и введения понятия "сплошная среда". Осуществляется, тем самым, переход от обратимых микроскопических уравнений движения частиц газа к необратимым кинетическим и гидродинамическим уравнениям для макроскопических функций "сплошной среды".

При таком переходе атомарная структура системы принимается во внимание при определении понятия "точка сплошной среды". Для этого необходимо конкретное определение физически бесконечно малых масштабов времени и длины и соответствующего физически бесконечно малого объема, который и определяет объем "точки" сплошной среды [11, 18, 4].

Естественно, что желательное согласование определения физически бесконечно малых масштабов с определением минимальной области перемешивания и минимальным временем развития динамической неустойчивости.

7. Критерий относительной степени упорядоченности состояний открытых систем. S-теорема

Среди различных макроскопических функций только энтропия S обладает совокупностью свойств, позволяющих использовать ее в качестве *меры неопределенности* (хаотичности) при статистическом описании процессов в макроскопических системах. Энтропия первоначально была введена в термодинамике, как функция состояния, изменение которой определяет количество переданного системе тепла $dQ = TdS$. Это равенство выражает второй закон термодинамики для квазистатических, т.е. обратимых процессов. При обратимом адиабатическом процессе, когда $dQ = 0$, энтропия неизменна.

Больцман дал статистическое определение энтропии как для равновесных, так и неравновесных (необратимых) процессов и доказал знаменитую H-теорему.

Она гласит: при временной эволюции к равновесному состоянию энтропия системы возрастает и остается неизменной при достижении равновесного состояния. Поскольку энтропия является мерой неопределенности (хаотичности), то по теореме Больцмана при временной эволюции к равновесному состоянию степень хаотичности монотонно возрастает и имеет максимальное значение в состоянии равновесия.

При этом существенно следующее.

В процессе эволюции в замкнутой системе по уравнению Больцмана к равновесному состоянию средняя энергия $\langle E \rangle$ остается неизменной. Сохранение средней энергии в процессе эволюции не является, однако, общим свойством всех кинетических уравнений.

Так, для броуновского движения она меняется в процессе эволюции к равновесному состоянию. По этой причине H-теорема Больцмана неприменима непосредственно для этого случая. Роль энтропии при броуновском движении играет функция, которая является аналогом термодинамической свободной энергии при неравновесных процессах. Однако свободная энергия не обладает набором необходимых свойств, чтобы служить мерой неопределенности состояния системы. Таким набором свойств обладает только энтропия.

Естественно, что *критерий относительной степени упорядоченности* должен быть общим. Нет оснований ограничиться лишь классом систем, для которых в процессе эволюции средняя энергия сохраняется. Как же решить эту проблему?

Поскольку энтропия — единственная функция, обладающая свойствами меры хаотичности, то остается лишь одна возможность. Надо провести переопределение энтропии так, чтобы средняя энергия оставалась бы в процессе эволюции неизменной.

Здесь речь шла о временной эволюции. Можно рассматривать эволюцию стационарных состояний открытой системы при медленном изменении значений управляющих параметров. Именно для такого рода эволюции и будет ниже введен критерий относительной степени упорядоченности состояний открытых систем. Впервые этот критерий был сформулирован на конкретных примерах [12] и получил название "S-теорема". Поздней была дана общая формулировка этого критерия для сравнения относительной степени упорядоченности непосредственно по экспериментальным данным [18, 4].

В названии "S-теорема" буква S — начальная буква английского написания слова самоорганизация (Selforganization). В связи с этим интересно отметить, что название "H-теорема" установилось не сразу. Оно было предложено английским физиком Бербери лишь через несколько лет после ее доказательства. В названии "H-теорема" буква H происходит от английского слова Heat — тепло.

Рассмотрим эволюцию стационарных состояний некоторой открытой системы при изменении управляющего параметра a . Выделим два состояния при значениях параметра $a = a_0$ и $a = a_1$. Это могут быть, например, стационарные состояния генератора Ван дер Поля при разных значениях параметра обратной связи [12]. При описании генерации учитываются, разумеется, флуктуации тока и заряда. Тогда первому состоянию, когда обратная связь отсутствует, отвечают тепловые колебания тока и заряда в электрическом контуре. Второму значению отвечает, например, состояние разви-

той генерации, при значениях параметра обратной связи, значительно превышающих пороговое значение.

Степень упорядоченности выделенных состояний в общем случае различна и, следовательно, одно из них более хаотично. Назовем его "*состояние физического хаоса*". Оно, как правило, является неравновесным и более упорядочено, чем равновесное состояние. Однако в случае генератора при $a = a_0$ оно совпадает с равновесным состоянием.

Обозначим через X значение макроскопической характеристики стационарного состояния. Для генератора в качестве X может выступать, например, энергия колебаний E . Обозначим через f_0, f_1 функции распределения двух выделенных состояний, а через S_0, S_1 — соответствующие значения энтропии.

В общем случае для открытой системы нет понятия энергии, поэтому можно ввести лишь *эффективную энергию*. Ее можно назвать и эффективной функцией Гамильтона и обозначить через H_{eff} . Она определяется через функцию распределения состояния физического хаоса: $H_{\text{eff}} = -\ln f_0$. При изменении значения управляющего параметра эффективная функция Гамильтона как правило не сохраняется. По этой причине для использования разности энтропий $S_0 - S_1$ в качестве меры относительной степени упорядоченности выделенных состояний необходима замена функций f_0, S_0 на соответствующие новые значения $\tilde{f}_0, \tilde{S}_0$. Они будут определены из условия равенства для рассматриваемых состояний средней эффективной функции Гамильтона. Если, как в случае генератора Ван дер Поля, состояние физического хаоса совпадает с равновесным состоянием, то перенормировка осуществляется путем замены температуры T на новое значение $\tilde{T}$. Оно определяется путем решения уравнения, которое выражает условие равенства средней эффективной функции Гамильтона в двух рассматриваемых состояниях, которое имеет вид

$$\int H_{\text{eff}} \tilde{f}_0(X, a = a_0) dX = \int H_{\text{eff}} f_1(X, a = a_1) dX. \quad (1)$$

Если выбор "*состояния физического хаоса*" сделан правильно, то решение этого уравнения имеет вид

$$\tilde{T}(a) \geq T. \quad (2)$$

Знак равенства имеет место при $a = a_0$, т.е. для состояния физического хаоса. Мы видим, что для выравнивания средних энергий состояние "0" надо "подогреть".

Поскольку сравнение производится теперь при одинаковых значениях средней эффективной энергии, то разность энтропий $\tilde{S}_0, S_1$ может теперь служить мерой относительной степени упорядоченности выделенных состояний.

Представим перенормированную функцию распределения в форме канонического распределения Гиббса:

$$\tilde{f}_0(X) = \exp \frac{F_{\text{eff}}(\tilde{T}) - H_{\text{eff}}(X)}{k\tilde{T}}. \quad (3)$$

Соответствующее выражение для энтропии Больцмана–Гиббса–Шеннона определяется выражением:

$$\tilde{S}_0 = - \int \ln(\tilde{f}_0(X)) \tilde{f}_0(X) dX. \quad (4)$$

Вернемся к уравнению (1). Если состояние "0" совпадает с равновесным, то решение этого уравнения имеет вид (2). В нем T — температура. В общем же случае

состояние "0" — состояние физического хаоса является неравновесным. В распределение (3) входит эффективная температура. Для состояния физического хаоса она равна единице. Таким образом, решение (2) следует записать в виде

$$\tilde{T}(a) \geq 1. \quad (5)$$

Знак равенства и здесь отвечает состоянию физического хаоса. Однако эффективные температура и свободная энергия являются теперь безразмерными. Если при значениях управляющего параметра $a > a_0$ имеет место неравенство (5), то сделанный нами выбор состояния "0" в виде физического хаоса подтверждается, и относительная степень упорядоченности выделенных состояний определяется разностью соответствующих энтропий.

Используем выражение (3) для функции распределения $\tilde{f}_0$ и условие постоянства средней эффективной функции Гамильтона, выражение для разности энтропий можно представить в виде неравенства:

$$\tilde{S}_0 - S_1 = - \int \left(\ln \frac{f_1(X)}{\tilde{f}_0} \right) f_1(X) dX \geq 0. \quad (6)$$

При условии

$$\langle H_{\text{eff}} \rangle = \text{const}. \quad (7)$$

При получении формулы (6) использовано известное неравенство $\ln a \geq 1 - 1/a$ при $a = f_1/\tilde{f}_0$.

Итак, результат расчета относительной степени упорядоченности двух выделенных неравновесных состояний выражается двумя неравенствами. Первое из них (5) подтверждает правильность выбора состояния "0" в качестве физического хаоса. При противоположном неравенстве следовало бы за физический хаос принять состояние "1". Формула (6) дает количественную меру относительной степени упорядоченности выделенных состояний.

Приведенный расчет проведен для случая одного параметра a . При наличии нескольких управляющих параметров возможна оптимизация поиска наиболее упорядоченного состояния.

Применим теперь "*S-теорему*" для определения относительной степени упорядоченности при переходе от ламинарного течения к турбулентному [4, 18, 20].

8. Является ли турбулентное движение более хаотическим, чем ламинарное?

Понятие "*турбулентное движение*" было введено в науку более ста лет назад. Однако до недавнего времени не было убедительного ответа на вопрос: какое из двух движений — ламинарное или турбулентное — является более хаотическим? Подавляющему числу исследователей представляется почти очевидным ответ: ламинарное движение является более упорядоченным. При этом, однако, происходит смешение понятий "*сложность*" и "*упорядоченность*".

Большая сложность турбулентного течения видна, как говорят, и невооруженным глазом. Однако для определения относительной степени упорядоченности необходимо использование критерия относительной степени упорядоченности. Расчет на основе *S-теоремы* позволил конкретизировать общие результаты (5), (6) на

случай перехода от ламинарного течения в трубе к стационарному турбулентному течению.

При этом за состояние физического хаоса по предположению принимаем ламинарное течение. Это будет оправдано ниже. Роль эффективной функции Гамильтона играет средняя кинетическая энергия при ламинарном течении. Для выполнения равенства этой энергии при ламинарном и турбулентном течениях ламинарный поток надо "подогреть"

$$k_B T_{\text{lam}} = k_B T_{\text{turb}} + \frac{m}{3} \langle (\delta u)^2 \rangle \geq k_B T_{\text{turb}}. \quad (8)$$

При этом разность температур определяется суммой квадратов диагональных элементов *тензора напряжений Рейнольдса*. Поскольку напряжения Рейнольдса представляют собой коллективные степени свободы, то возможна следующая трактовка последнего равенства. Оно показывает, что часть теплового (хаотического) движения ламинарного течения при переходе к турбулентному движению заменяется коллективными степенями свободы. Это и оправдывает выбор напряжений Рейнольдса в качестве параметра порядка при турбулентном течении.

Все сказанное и оправдывает выбор ламинарного потока в качестве состояния физического хаоса.

Таким образом, по мере развития турбулентности доля хаотического движения уменьшается, а доля более упорядоченного — растет. Это, как мы сейчас увидим, и отражается в уменьшении энтропии.

Результат (6), определяющий в рассматриваемом случае относительную степень упорядоченности ламинарного и турбулентного течений, имеет вид:

$$T(S_{\text{lam}} - S_{\text{turb}}) = \frac{mn}{2} \langle (\delta u)^2 \rangle \geq 0. \quad (9)$$

Таким образом, энтропия турбулентного течения меньше, чем ламинарного. Это и означает, что турбулентное течение более упорядочено. Роль *управляющего параметра* играет здесь разность давлений на концах трубы. При нулевом ее значении жидкость находится в состоянии равновесия, когда степень хаотичности максимальна. Это еще один важный пример физической системы, когда за точку отсчета степени хаотичности можно принять равновесное состояние. Другим примером служил нам генератор Ван дер Поля.

Все состояния при отличной от нуля разности давления более упорядочены. Это и дает основание, в соответствии с изложенным в разделе 3, считать процесс перехода от ламинарного состояния к турбулентному примером процесса самоорганизации. Это, однако, не означает, что степень упорядоченности по мере увеличения числа Рейнольдса растет монотонно.

Заметим, что большая организованность турбулентного течения по сравнению с ламинарным проявляется также в следующем.

При ламинарном течении перенос импульса в потоке от слоя к слою осуществляется молекулярным механизмом — независимыми изменениями импульса отдельных частиц газа.

В противоположность этому, при турбулентном течении передача импульса от слоя к слою является процессом коллективным. Это можно выразить словами: индивидуальное, неорганизованное движение при ламинарном течении сменяется при переходе к турбу-

лентному течению коллективным и, следовательно, более высокоорганизованным сопротивлением.

Это выражается в том, что коэффициент турбулентной вязкости много больше соответствующего коэффициента вязкости при ламинарном потоке.

Большая упорядоченность турбулентного движения подтверждается также расчетом производства энтропии.

9. Определение относительной степени упорядоченности по экспериментальным данным

Для практического использования S-теоремы необходимо знать эффективную функцию Гамильтона. Ее определение не представляет принципиальных трудностей, если известна математическая модель процесса. Во многих случаях, однако, даже для физических систем не удается найти адекватную математическую модель рассматриваемой открытой системы. Эта задача является еще более сложной при исследовании биологических, социальных и экономических объектов.

В связи с этим надо иметь возможность определения относительной степени упорядоченности открытых систем непосредственно по экспериментальным данным. Необходимая для этого последовательность действий такова.

1. Проводим для рассматриваемой системы выбор управляющих параметров. Выбираем два состояния системы при значениях управляющих параметров a_0 и $a_0 + \Delta a$.

2. Для выбранных параметров системы экспериментально получаем достаточно длинные временные реализации:

$$X_0(t, a_0), \quad X(t, a_0 + \Delta a). \quad (10)$$

Вводим эти данные в компьютер и по ним строим соответствующие функции распределения:

$$f_0(X, a_0), \quad f(X, a_0 + \Delta a). \quad (11)$$

Оба распределения нормированы на единицу.

Далее действуем по известному уже рецепту.

3. Принимаем одно из состояний, например "0", за состояние физического хаоса и определяем эффективную функцию Гамильтона:

$$H_{\text{eff}} = -\ln f_0(X, a_0). \quad (12)$$

Тем самым, она определяется непосредственно по экспериментальным данным. Как и выше, название "эффективная функция Гамильтона" оправдано тем, что перенормированная к заданному значению $\langle H_{\text{eff}} \rangle$ функция распределения имеет форму канонического распределения Гиббса:

$$\tilde{f}_0(X) = \exp \frac{F_{\text{eff}}(\tilde{T}) - H_{\text{eff}}(X)}{k\tilde{T}}. \quad (13)$$

Здесь T — эффективная температура. Для состояния физического хаоса $T = 1$.

Эффективная свободная энергия, как функция T , определяется из условия нормировки функции $\tilde{f}_0$. Зависимость эффективной температуры от изменения управ-

ляющего параметра Δa находим, как и выше, из условия постоянства средней эффективной энергии:

$$\int H_{\text{eff}} \tilde{f}_0(X, a_0) dX = \int H_{\text{eff}} f(X, a_0 + \Delta a) dX. \quad (14)$$

Если решение этого уравнения имеет вид (5), то выбор состояния физического хаоса оправдан. Расчет относительной степени упорядоченности снова проводится по формуле (6).

10. Диагностика медико-биологических объектов по S-теореме

Рассмотрим некоторые приложения S-теоремы для целей медико-биологической диагностики. Такого рода исследования начали проводиться с 1990 г. в Киеве и в Москве как на основе математических моделей, так и по экспериментальным данным. В 1994 г. в лабораториях нелинейной динамики Саратовского и Подсдамского университетов получены результаты диагностики по кардиограммам на основе S-теоремы. Работы выполнялись совместно с биологами и медиками [22–24].

Анализ относительной степени упорядоченности для целей медико-биологической диагностики проводился как по данным, относящимся к отдельным испытуемым, так и по данным для выделенных групп пациентов.

В биологических исследованиях Т.Г. Анищенко было обнаружено существенное различие в откликах на стрессы для мужских и женских особей. Опыты проводились на крысах. На основании биохимических анализов было установлено, что изменения состояния мужских и женских особей противоположны по знаку. В связи с этими результатами возникла идея сравнительного анализа откликов на стрессы для мужчин и женщин. Оценка также проводилась по S-теореме.

Для каждого участника эксперимента были получены две кардиограммы. Первая до стресса, т.е. при обычном функционировании организма, а вторая после стресса. Источником стресса служил одинаковый для всех испытуемых резкий звуковой сигнал.

В результате для каждого испытуемого имелись две кардиограммы. Это давало возможность определения по S-теореме изменения относительной степени упорядоченности в результате стресса для каждого испытуемого в отдельности. Обработка результатов показала, что изменения степени упорядоченности у мужчин и женщин противоположны по знаку. Именно, у всех женщин в результате стресса степень хаотичности увеличивалась, а у мужчин — уменьшалась.

Оба результата представляют собой отклонения от "нормы хаотичности" и могут рассматриваться как "болезнь". Вопрос о том, какое из этих "заболеваний" является более опасным, могут решать только медики.

Возврат к "норме хаотичности" может быть естественным. Тогда "выздоровление" идет без внешнего вмешательства. Управляющим параметром здесь служит время.

Если возвращение к норме происходит под действием лекарств, то можно по тому же критерию оценивать эффективность тех или иных медикаментов.

Естественно, что каждый врач осуществляет лечение по своим критериям, не основанным на S-теореме. Однако объективная дополнительная информация на

основе описанного анализа кардиограмм может оказаться полезной.

Для целей медицинской диагностики естественно стремление делать выводы не только на основе данных об отдельном пациенте, но и статистические данные, относящиеся к группам пациентов. Однако первые проведенные исследования основываются на предположении, что сердечно-сосудистая система и управляющая ею нервная система для всех пациентов одинаковы. Это сводит, фактически, проблему к исследованию одной системы, находящейся в разных состояниях.

Анализ проводился по тахограммам, которые определяют зависимость интервалов между ударами сердца от времени. Установление "точки отсчета" относительной степени упорядоченности проводилось на основе S-теоремы по спектрам мощности тахограмм группы здоровых людей. За точку отсчета физического хаоса принималось состояние испытуемого из группы "здоровых", для которого степень хаотичности тахограммы максимальна. Обозначим энтропию этого состояния через $\tilde{S}_0$. Тогда основной характеристикой является разность энтропий

$$\Delta S = S - \tilde{S}_0, \quad (15)$$

которая характеризует относительную степень хаотичности по отношению к состоянию, принятому за "норму хаотичности" в группе здоровых людей.

После этого производились соответствующие исследования для большой группы пациентов. Оказалось, что по рассматриваемому критерию больные составляют три группы. Больные, у которых болезнь выражается в уменьшении степени хаотичности, т.е. появляется "избыточная упорядоченность". Две другие группы составляют пациенты, у которых заболевание выражается в увеличении степени хаотичности работы сердца. В одной из этих групп пациенты, у которых увеличение степени хаотичности не слишком велико. Ко второй же относятся больные с анамально большой степенью хаотичности работы сердца.

Напомним, что эти исследования основаны на весьма сильном предположении об идентичности сердечно-сосудистой системы всех испытуемых. Поскольку исследуются лишь относительные характеристики, то это ограничение может оказаться не слишком сильным. Во всяком случае эти исследования показывают, что S-теорема является достаточно чувствительным критерием для диагностики медико-биологических систем.

11. Что же такое самоорганизация?

Выше были выделены два класса систем.

К первому из них относятся, в частности, многие физические системы. Выше были рассмотрены два примера. Это, во-первых, генератор Ван дер Поля, в котором по мере увеличения обратной связи происходит сначала компенсации потерь (электрического сопротивления), а при дальнейшем ее увеличении — переход в режим развитой генерации. По S-теореме здесь имеет место процесс самоорганизации. Началом такого процесса служит равновесное состояние — тепловые колебания в электрическом контуре при отсутствии обратной связи. Это дает основание предполагать, что процесс самоорганизации — это переход от наиболее хаотиче-

ского (равновесного) состояния к более упорядоченному состоянию. Здесь — режиму автоколебаний.

Подобная же ситуация имеет место и при переходе от ламинарного течения в трубе к турбулентному по мере увеличения перепада давления (увеличения числа Рейнольдса).

Здесь также за начало отсчета равновесного состояния можно принять равновесное состояние жидкости при нулевом перепаде давления — при нулевом значении управляющего параметра. В этом случае гидродинамическое движение отсутствует и имеет место лишь хаотическое движение молекул жидкости. Оно и является наиболее хаотическим.

Здесь снова процесс самоорганизации есть переход от более хаотического состояния к менее хаотическому. Является ли такое понимание самоорганизации общим? На основании изложенного в последнем разделе можно сделать заключение, что в процессе самоорганизации увеличение степени упорядоченности не является необходимым условием.

Действительно, существует широкий класс систем — этот прежде всего биологические системы, для которых состояния как полного хаоса (термодинамически равновесные состояния), так и полного порядка не могут быть реализованы. При этих условиях их функционирование просто невозможно.

Для таких систем более фундаментальным является понятие "нормы хаотичности", которое уже неоднократно использовалось выше. Его можно сопоставить понятию "здоровье". Тогда *процессом самоорганизации* можно назвать *процесс выздоровления*.

Вернемся в связи с этим к описанным выше исследованиям откликов на стрессы для мужчин и женщин. Состояние после стресса мы условились называть "болезнью". Но тогда для женщин *переход к норме хаотичности* — *выздоровление*, которое мы и условились называть процессом самоорганизации, есть переход от более хаотического состояния к менее хаотическому состоянию.

Напротив, для мужчин, как мы видели, состояние после стресса — "болезнь" отвечает более упорядоченному состоянию.

Это означает, что выздоровлению — процессу самоорганизации отвечает теперь переход от более упорядоченного состояния к более хаотическому.

Мы видим, тем самым, что для биологических систем смысл понятий *самоорганизация* и *деградация* не имеет однозначной связи, соответственно, с увеличением (при самоорганизации) или, напротив, уменьшения (при деградации) степень упорядоченности.

Здесь более фундаментальным является понятие "нормы хаотичности", которое для биологических систем может устанавливаться по эмпирическим данным на основе критерия "S-теорема".

Подведем некоторые итоги.

Выше было отмечено, что лишь в некоторых случаях наличие самоорганизации представляется очевидным. Одним из примеров может служить развитие генерации в системе Ван дер Поля по мере увеличения обратной связи. Другим очень популярным примером служит появление структуры — ячеек Бенара на поверхности слоя жидкости при подогреве снизу, а также вихрей Тейлора между вращающимися коаксиальными цилиндрами. Используя замечательный термин "диссипатив-

ные структуры", введенный И. Пригожиным, можно сказать, что процесс самоорганизации представляет самопроизвольное (спонтанное) возникновение структур в нелинейных диссипативных открытых системах. В генераторе Ван дер Поля — это временные диссипативные структуры. Ячейки Бенара и вихри Тейлора представляют собой примеры пространственных диссипативных структур. Примером пространственно-временной структуры может служить знаменитая химическая реакция Белоусова–Жаботинского. Во всех этих случаях при выключении управляющих параметров (обратной связи, градиента температуры и т.д.) система находится в состоянии покоя — в состоянии термодинамического равновесия.

Такое понимание термина "самоорганизация" является основой теории образования диссипативных структур. Первое систематическое изложение этого круга вопросов дано в известных работах И. Пригожина и Г. Николиса [25]. Отправным пунктом здесь служат идеи и результаты И. Пригожина по термодинамике необратимых неравновесных процессов.

В работах Г. Хакена в основу теории самоорганизации положены идеи возникновения структур при коллективных взаимодействиях. Таким образом, на первый план выдвигается роль кооперативных процессов. По этой причине Г. Хакен предложил для этого нового междисциплинарного научного направления название "синергетика". Базовыми уравнениями синергетики также являются нелинейные диссипативные уравнения, например, реакционно-диффузионные уравнения или временные уравнения Гинзбурга–Ландау.

В более сложных ситуациях, например при переходе от одного турбулентного движения к другому, в биологических системах различить процессы деградации и самоорганизации можно лишь на основе критерия относительной степени упорядоченности состояний открытых систем. При этом представление о самоорганизации, как об образовании структур или как о процессе от менее упорядоченного к более упорядоченному состоянию, становится недостаточным.

Такой вывод относится ко всем системам, для которых равновесное состояние не может служить "точкой отсчета" относительной степени хаотичности. Здесь на первый план выходит понятие "нормы хаотичности", которое, разумеется, относится в общем случае к неравновесному состоянию. При этом процессу самоорганизации отвечает переход от "болезни" к "нормальному состоянию". Поскольку отклонение от нормы имеет два направления — в сторону большей и меньшей степени хаотичности, то два направления имеет в общем случае и процесс самоорганизации.

Таким образом, традиционное определение процесса самоорганизации, как самопроизвольного (спонтанного) образования структур в динамических нелинейных диссипативных открытых системах, становится слишком "узким". Для более полного описания процессов самоорганизации, и даже только для их выявления, нужно обратиться к методам *статистической теории открытых систем* [4]. Ее базовыми уравнениями являются кинетические уравнения для функций распределения $f(X, R, t)$ значений наиболее важных для рассматриваемой проблемы внутренних параметров X в пространстве и во времени. На их основе может быть получен широкий класс динамических нелинейных диссипативных уравне-

ний для моментов функции распределения $f(X, R, t)$, в частности, реакционно-диффузионные уравнения для первых моментов $X(R, T)$ — базовые уравнения современной теории самоорганизации — синергетики.

Из изложенного может сложиться впечатление, что столь важное для многочисленных приложений междисциплинарное научное направление *теория самоорганизации* — *синергетика* очень молодо. В большой мере это действительно так. Однако корни происхождения термина "самоорганизация" уходят в глубь веков. Это очень интересный вопрос. Отметим лишь следующее.

В 1966 г. на русском языке была издана книга "Принципы самоорганизации" [25]. Это сборник докладов на Симпозиуме в университете Иллинойса (США) в 1961 г. Приведем выдержку из предисловия редактора русского издания А.Е. Лернера: "Несмотря на огромную распространенность самоорганизующихся систем и настойчивые попытки ученых понять явления, происходящие в таких системах, самоорганизация остается на протяжении многих веков, пожалуй, самым загадочным явлением, самой сокровенной тайной природы". Далее читаем: "...читатель не найдет в нем (в сборнике — Ю.К.) ни одной работы, которая претендовала бы на раскрытие тайн самоорганизации".

Редактор американского издания Heinz von Foerster во введении к книге, ссылаясь на рассказ знаменитого греческого философа Платона, пишет: "В доме Агафона было положено начало бессмертному первому симпозиуму по проблемам, стоящим на стыке нескольких наук, в котором приняли участие философы, государственные деятели, драматурги, поэты, социологи, лингвисты, врачи и студенты различных специальностей".

В докладе известного специалиста У.Р. Эшби имеется высказывание, что слово "самоорганизация" может также означать "переход от плохой организации к хорошей". Здесь, однако, не указывается, как отличить "плохую" организацию от "хорошей". В приведенном выше примере анализа состояния по кардиограммам этому и соответствует умение различать состояния "больного" и "здорового" организма. Такое различие может быть выявлено, в частности, на основе рассмотренного выше критерия относительной степени хаотичности состояний открытых систем.

Естественно, что существуют и другие критерии диагностики различных, в частности, биологических систем. Вопрос о сопоставлении различных методов диагностики составляет отдельную задачу.

12. Физика открытых систем для социологов и экономистов

Одно из первых приложений синергетики к социологии принадлежит Г. Хакену [6]. Основой применения синергетики для этих целей служит несомненный факт, что коллективные эффекты играют существенную роль в социальных процессах. Они в значительной степени определяют, например, формирование общественного мнения, несмотря на то, что отдельные акты выбора являются, конечно, индивидуальными. На основе синергетики широкие исследования моделей социальных систем проводились группой В. Вайдлиха [27]. Были, в частности, предложены простейшие модели для описания формирования общественного мнения, миграции населения, роста городов.

Методы синергетики в последние годы все шире используются и для моделирования процессов в экономике. Экономика — одна из старейших социальных наук с глубокими традициями и развитыми методами не только качественного, но и количественного описания различных процессов. Несмотря на это, остается еще много нерешенных проблем, представляющих широкое поле приложений физики открытых систем.

Значительная их часть связана с поиском оптимальных путей развития связей производства, распределения и потребления. Основой поиска могут служить рассмотренные выше критерии относительной степени упорядоченности открытых, но теперь уже социальных или экономических систем. Это может дать дополнительную информацию для контроля эффективности параметров, принимаемых за управляющие, определения "нормы хаотичности", а также "лечения болезней" — отклонений от "нормы хаотичности" в ту или иную сторону.

Если процессы "лечения" происходят спонтанно, т.е. без внешних вмешательств — без "лекарств", то и здесь процессы "выздоровления" представляют собой примеры самоорганизации. Естественно, что, как и для биологических систем, равновесное состояние не может здесь служить точкой отсчета при определении относительной степени хаотичности состояний социальных и экономических систем. Точкой отсчета может служить для них лишь состояние, отвечающее "норме хаотичности". Выявление такого состояния и составляет одну из основных задач, которая может быть решена на основе критериев относительной степени упорядоченности в физике открытых систем.

13. Заключительные замечания

Несколько лет назад появилась популярная книга итальянского исследователя Джузеппе Кальоти "Динамика неоднозначности". Она издана на итальянском (1982 г., 1986 г.), на немецком (1990 г.) и английском (1992 г.) [28] языках. Английское издание вышло с предисловием Г. Хакена. К готовящемуся изданию на русском языке предисловие написал И. Пригожин. И тот, и другой очень высоко оценивают книгу. О чем же эта книга, заслужившая столь высокую оценку?

Эта книга прежде всего о связи и соотношении в современном мире науки и искусства или, как теперь говорят, о связи "двух культур". Отметим лишь трактовку автором перехода от восприятия к мысли. На одной из первых страниц книги он пишет: "При исследовании восприятия могут проявиться объединяющие факторы. Именно, неупорядоченные в начале сенсорные стимулы начинают коррелировать и организуются в мозгу в упорядоченные когерентные структуры, которые затем и превращаются в мысль". Короче это можно выразить словами: переход от восприятия к мысли — это переход от менее упорядоченного состояния мозга к более упорядоченному его состоянию.

Конечно, это очень красивая схема рождения мысли. Остается, однако, открытым вопрос, насколько эта картина отвечает реальности. В книге такого ответа нет, поскольку в ней не рассматриваются критерии относительной степени упорядоченности состояний открытых систем, позволяющие отличить "порядок" от "хаоса". Несомненно, что некоторая информация об изменении

степени упорядоченности в ходе рождения мысли может быть получена на основе анализа энцефалограмм по приведенным выше критериям физики открытых систем, в частности, по *S-теореме*.

При этом возможен целый комплекс экспериментальных исследований: "скорости рождения мысли", различия этого процесса, например, для мужчин и женщин, о степени воздействия на людей искусства и т.д. Естественно, что решение такой сложной проблемы возможно лишь при объединении усилий исследователей разного профиля.

Наконец, нельзя, в связи с изложенным выше, не вспомнить о знаменитой книге Эрвина Шрёдингера "Что такое жизнь". Впервые она была опубликована на английском языке в 1944 году. Ее русское издание было осуществлено в 1947 году. Отметим из нее лишь то, что непосредственно связано с темой настоящей работы.

Предпоследняя глава книги носит название: "Упорядоченность, неупорядоченность и энтропия". В ней ставится вопрос: "Что является характерной чертой жизни?" Ответ на этот вопрос находим на с. 105 русского издания:

"Как можно было бы выразить в терминах статистической теории ту удивительную способность живого организма, с помощью которой он задерживает переход к термодинамическому равновесию (смерть)? Мы выше сказали: "Он питается отрицательной энтропией", как бы привлекая на себя ее поток, чтобы компенсировать этим увеличение энтропии, производимое им в процессе жизни, и таким образом поддерживать себя на постоянном и достаточно низком уровне энтропии.

Если D есть мера неупорядоченности, то обратная величина $1/D$ может рассматриваться как прямая мера упорядоченности.

Поскольку логарифм $1/D$ есть то же, что отрицательный логарифм D , мы можем написать формулу Больцмана таким образом:

$$-(\text{энтропия}) = k_B \log\left(\frac{1}{D}\right). \quad (16)$$

Теперь неуклюжее выражение "отрицательная энтропия" может быть заменено лучшим: энтропия, взятая с отрицательным знаком, есть сама по себе мера упорядоченности.

Таким образом, средством, при помощи которого организм поддерживает себя постоянно на достаточно высоком уровне упорядоченности (соответствующем достаточно низкому уровню энтропии), в действительности состоит в непрерывном извлечении упорядоченности из окружающей среды".

Изложенная в этом отрывке позиция чрезвычайно интересна, поскольку отражает точку зрения, которая в течение многих лет разделялась не только многими биологами, но и многими физиками. Изложенное в настоящей работе позволяет сопоставить представление Шрёдингера с изложенными выше результатами.

Согласно *S-теореме* энтропия может быть использована в качестве меры относительной степени упорядоченности состояний открытой системы лишь при дополнительном условии одинаковости средней эффективной энергии рассматриваемых состояний.

Одно из сравниваемых состояний с энтропией S_0 принимается за физический хаос. Для выполнения усло-

вия одинаковости средних энергий систему в этом состоянии следует "подогреть". При этом энтропия $S_0 \rightarrow \tilde{S}_0$. Тогда разность перенормированной энтропии и энтропии S более упорядоченного состояния:

$$\tilde{S}_0 - S \geq 0 \quad (17)$$

является мерой количества беспорядочного движения состояния физического хаоса, которое во втором состоянии становится более упорядоченным.

Выше мы продемонстрировали это на физических примерах. Первым из них был генератор Ван дер Поля. В нем состоянию физического хаоса отвечали тепловые колебания в электрическом контуре при отсутствии обратной связи. Вторым служило состояние развитой генерации. Для выравнивания средних энергий первое состояние "подогревалось". В результате выражение вида (17) служило мерой количества энергии тепловых колебаний в контуре, которая в режиме генерации переходит в энергию упорядоченных колебаний. Такая трансформация характера движения и служит простейшим примером спонтанного (!) перехода в более упорядоченное состояние — примером процесса самоорганизации.

Вторым подобным примером служил переход от ламинарного течения к турбулентному. За состояние физического хаоса принималось ламинарное течение. Для выравнивания средних энергий "подогревалось" ламинарное течение. В результате перехода часть хаотического движения ламинарного потока переходит в более упорядоченное (коллективное) движение турбулентного течения. Этот переход служит также примером процесса самоорганизации.

Мы видели, что для биологических систем определение процесса самоорганизации не является столь однозначным. На первый план выходит определение нормы хаотичности (или упорядоченности). Процесс самоорганизации представляется как процесс спонтанного (без действия "лекарств") возвращения к норме хаотичности — процесс выздоровления.

При этом "организм", как открытая система, поддерживает свое существование благодаря создаваемой возможности преобразовывать энергию более хаотического движения в энергию более упорядоченного движения. Возможны, тем самым, определенные уточнения высказанной Шрёдингером точки зрения.

Очень интересно еще одно утверждение Шрёдингера, приведенное в последней главе его книги. На с. 108 русского издания:

"Удивительная способность организма концентрировать на себе "поток порядка", избегая таким образом перехода к атомному хаосу, — способность "пить упорядоченность" из подходящей среды, по-видимому, связана с присутствием "апериодических твердых тел" — хромосомных молекул. Последние, без сомнения, представляют наивысшую степень упорядоченности среди известных нам ассоциаций атомов (более высокую, чем у обычных периодических кристаллов)".

Это, поистине, замечательная идея. Ее подробное обсуждение не может быть здесь проведено. Поставим лишь следующий вопрос: является ли апериодический кристалл, с точки зрения приведенной выше теории, более упорядоченным, чем обычный периодический кристалл? Есть определенные основания предполагать, что является!

Действительно, проведем аналогию с определением относительной степени упорядоченности ламинарного и турбулентного течений. Естественно сопоставить ламинарному потоку периодический кристалл, а турбулентному — аperiodический. Тепловое движение атомов в периодическом кристалле принимаем за состояние физического хаоса. Есть основание предположить, что в аperiodическом кристалле коллективные степени свободы играют большую роль, чем в периодическом. Тогда можно ожидать, что по критерию "S-теорема" степень упорядоченности аperiodического кристалла будет больше, чем периодического. Это предположение требует, конечно, количественного подтверждения.

Мы коснулись лишь отдельных пунктов книги Эрвина Шрёдингера. Она содержит много интересного и, несомненно, стимулирует развитие статистической теории открытых систем.

Список литературы

1. Волькенштейн М В *УФН* **143** (3) 429 (1984)
2. Пригожин И Р, Стенгерс И *Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой* (М.: Прогресс, 1986)
3. *Синергетика* (Под ред. Б Б Кадомцева) (М.: Мир, 1984)
4. Климонтович Ю Л *Статистическая теория открытых систем* (М.: Янус, 1995) [Translated into English (Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995)]
5. Васильев В А, Романовский Ю М, Яхно В Г *Автоволновые процессы* (М.: Наука, 1987)
6. Хакен Г *Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах* (М.: Мир, 1985)
7. Хакен Г *Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам* (М.: Мир, 1991)
8. Данилов Ю А, Кадомцев Б Б "Что такое синергетика?" в сб. *Нелинейные волны. Самоорганизация* (М.: Наука, 1983)
9. Haken H *Principles of Brain Functioning* (Berlin: Springer, 1995)
10. *Самоорганизация в науке* (Под ред. И Г Акчурина, В И Аршинова) (М.: Арго, 1994)
11. Климонтович Ю Л *Статистическая физика* (М.: Наука, 1982) [Translated into English (New York: Harwood Academic Publishers, 1986)]
12. Климонтович Ю Л *Письма в ЖТФ* **7** 1412 (1983)
13. Ebeling W, Klimontovich U L *Selforganization and Turbulence in Liquids* (Leipzig: Teubner, 1984)
14. Шустер Г *Детерминированный хаос* (М.: Мир, 1988)
15. Анищенко В С *Сложные колебания в простых системах* (М.: Наука, 1990) [Translated into English (Singapore: World Scientific, 1995)]
16. Lorenz E N *J. Atmospheric Sciences* **20** 130 (1963)
17. Крылов Н С *Работы по обоснованию статистической физики* (М.: АН СССР, 1950)
18. Климонтович Ю Л *Турбулентное движение и структура хаоса* (М.: Наука, 1990) [Translated into English (Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1991)]
19. Кадомцев Б Б *УФН* **165** 967 (1995)
20. Prigogine I *International Journal of Bifurcation and Chaos*. **5** 3 (1995)
21. Климонтович Ю Л *Известия вузов: Сер. Прикладная нелинейная динамика* **3** (2) 7 (1995)
22. Klimontovich Yu L *Chaos, Solitons & Fractals* **5** 1985 (1995)
23. Анищенко В С и др. *Известия вузов: Сер. Прикладная нелинейная динамика* **2** (3) 55 (1994)
24. Анищенко В С, Сапарин П И, Анищенко Т Г *Письма в ЖТФ* **24** 88 (1993)
25. Николис Г, Пригожин И *Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации* (М.: Мир, 1979)
26. *Принципы самоорганизации* (Под ред. А Я Лернера) (М.: Мир, 1966)
27. Weidlich W *Physics Reports* **204** (1) 1 (1991)
28. Caglioti G *Dynamics of Ambiguity* (Berlin: Springer, 1992)
29. Шрёдингер Э *Что такое жизнь с точки зрения физики?* (М.: ИЛ, 1947)

Relative ordering criteria in open systems

Yu.L. Klimontovich

*Department of Physics, M V Lomonosov State University,
Vorob'evy gory, 119899 Moscow, Russia
Tel. (7-095) 939-38 25. Fax (7-095) 143-85 47
E-mail: ylklim@hklim.phys.msu.su*

Main concepts of a new interdisciplinary research area known as 'Physics of Open Systems' are introduced with special reference to a criterion for the relative degree of order in nonequilibrium states of such systems. Based on this criterion, the notion of the 'norm of chaos' ('norm of order') is proposed and used to differentiate between degradation and self-organization processes. The possibility of applying methods of open system physics to investigations in economics, sociology and physiology is briefly discussed.

PACS numbers: **05.45. + b, 87.10. + e, 87.80. + s**

Bibliography — 29 references

Received 17 April 1996, revised 19 September 1996