

ЭФФЕКТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОДЫ КОЛЛЕКТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОТКРЫТЫХ СИСТЕМАХ С АДАПТИВНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

А.Е. Драчев, А.А. Кальнин, В.В. Лучинин

Материальная основа открытой системы может испытывать адаптивную перестройку под влиянием протекающих в ней коллективных процессов. Возникающие вследствие этого неоднородности обладают активностью. В определенных условиях они способны дать эффект избирательного направления эволюции коллективных процессов. На простом примере гидродинамической системы демонстрируется проявление эффекта, изложены элементы его качественной теории и показано предрасположение подобных систем к обучению.

Введение

В 60-х годах в результате усмотрения общности поведения открытых систем с нелинейным и кооперативным взаимодействием элементов, был сформулирован принцип возникновения упорядоченности через диссипацию энергии [1,2]. И. Пригожин ввел в физику понятие "диссипативная структура" (ДС). Этот принцип упорядоченности, возникающий вследствие потери устойчивости системы вдали от состояния термодинамического равновесия, является в известной мере антиподом так называемого Больцмановского принципа упорядоченности, проявляющегося вблизи состояния термодинамического равновесия [3]. Заметим, однако, что образование ДС может быть результатом потери устойчивости в одной из подсистем элементов, в то время как другие подсистемы могут рассматриваться как слабо возмущенные. Более того, в реальной открытой системе в закритической области обычно действуют оба механизма упорядоченности: диссипативный и Больцмановский, причем оба механизма находятся во взаимодействии. На это взаимодействие обращено внимание в работе [4]. Оно проявляется в том, что длительное существование развитой стационарной ДС способно вызвать появление неоднородностей в материальной основе открытой системы как специфической адаптивной реакции. Возникающие неоднородности, способные существовать и после прекращения влияния ДС, обладают активностью и действуют как эффективное средство модального отбора. Этот нетривиальный эффект был далее положен в основу метода распределенной и

ассоциативной записи сигналов, который имеет ряд выгодных отличий от голографического [5,6].

Упомянутые конфигурации (неоднородности), именуемые рефлексивными структурами (РС), являются своеобразными "отпечатками" ДС и могут рассматриваться как эффективное техническое (технологическое) средство создания аттракторов эволюционных траекторий, что выражает идею программной реализации неравновесных кинетических фазовых переходов.

В настоящей работе введен существенно новый элемент — возможность регулирования скорости эволюционных процессов в подсистеме формирования адаптивных неоднородностей. Таким образом, объектом исследования становится открытая система с двойной динамикой. На значение подобных систем обращено внимание в работах [7,8].

Целью данного исследования являются изучение закономерностей эволюции открытой системы с двойной динамикой и обоснование возможности создания обучаемых невычислительных систем, преобразовательным актом в которых является неравновесный кинетический фазовый переход.

Установка для проведения исследований

Ниже приведены данные по изучению эволюции открытой системы с двумя взаимодействующими эволюционными подсистемами: быстрой (упорядоченность через диссипацию энергии) и медленной (упорядоченность по механизму Больцмана). Основная методическая сложность в создании экспериментальной установки состояла в необходимости наблюдения без взаимных помех структурного состояния двух подсистем одновременно. Кроме того, необходимо регулирование скорости эволюции медленной подсистемы вплоть до ее останова ("замораживания") в любой желаемой стадии.

Схема установки, удовлетворяющей этим требованиям, представлена на рис. 1,а. Стекланный цилиндрический сосуд 1 с жидкостью, в которой возбуждается термогравитационная конвекция, находится на прозрачном основании 2, нагреваемом с помощью резистивной спирали 3. На мелкие твердые частицы, изначально однородно распределенные на дне сосуда 4, действуют силы вязких конвективных течений. Перемещение частиц активируется с помощью механических вибраций, сообщаемых от электромагнитного вибратора 7. Амплитуду вибраций с частотой 50 Гц можно было регулировать. Одновременное наблюдение структуры конвективного движения жидкости и образующихся под влиянием конвекции фигур из твердых частиц на дне сосуда производилось с помощью оптической системы. При возникновении конвекции плоскостность открытой поверхности жидкости нарушается и возникает слабоволнистый рельеф, соответствующий конфигурации конвективных течений. Облучение поверхности плоскопараллельным пучком света 8 создает системы рефлексов, обусловленные отражением от поверхности жидкости (R_A) (эффект вогнутого зеркала) и от дна сосуда (R_B) (эффект выпуклой линзы) (рис. 1,б). Эти две системы рефлексов могут быть взаимно скоординированы перемещением плоскости дна сосуда в положение строгой горизонтали. При этом R_A -рефлексы соответствуют восходящим, а R_B -рефлексы — нисходящим потокам жидкости. Фотографирование структуры течений осуще-

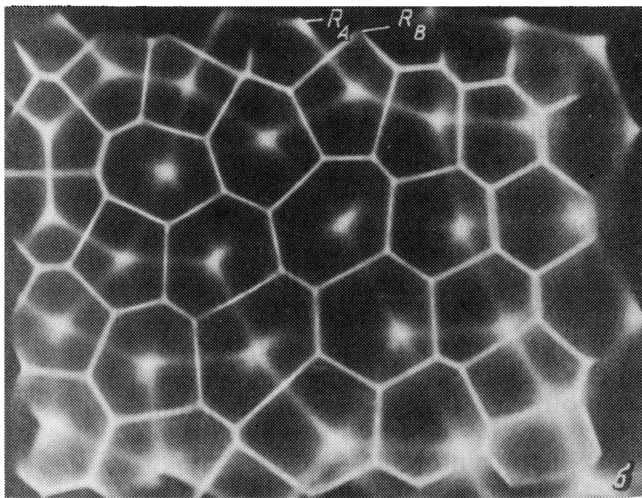
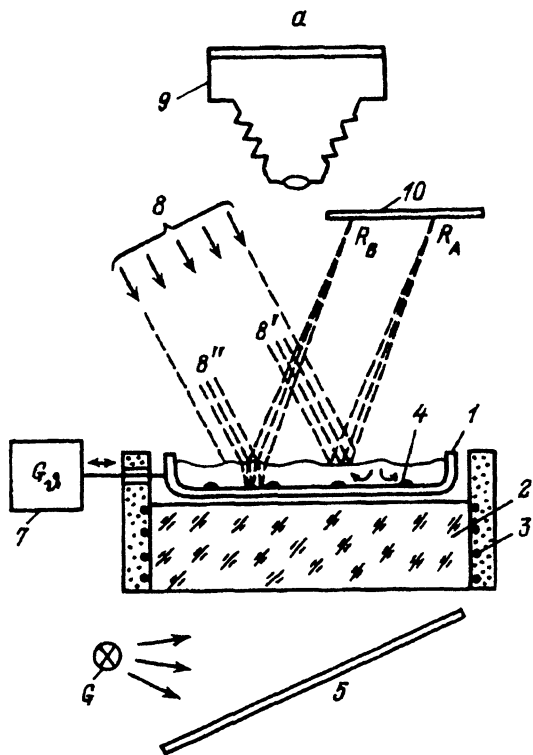


Рис. 1. Схема установки для изучения закономерностей эволюции открытой двух-уровневой самоорганизующейся системы.

(а) и две характерные системы рефлексов, возникающих вследствие фокусировки лучей, отраженных от поверхности жидкости с конвективным движением (R_F) и от дна стеклянного сосуда (R_B) (б).

ствлялось с помощью фотопластины 10. При этом одновременное фотографирование конфигураций скоплений (разрежений) твердых частиц

4 проводилось напросвет. Для этого использовали белую матовую поверхность 5, облучаемую источником 6 и фотографическую камеру 9. Снижение радиального градиента температуры достигалось с помощью теплоизоляции. Контроль температуры нижнего слоя жидкости проводился с помощью термопары. Градиент температуры, приводящий к конвективному движению жидкости, возникал вследствие естественного теплоотвода со стороны открытой поверхности.

Конвекцию возбуждали в вакуумном масле ВМ-1. Толщина слоя масла $h = 2.5$ мм, а диаметр сосуда $d = 50$ мм. Твердые частицы были подвергнуты сепарации по размерам методом седиментации и имели средний диаметр 0.15 мм, что позволило добиться наиболее контрастных фигур (рефлективных структур) многочисленными предварительными пробными экспериментами. Заметим также, что обычно применяемое для визуализации конвективных потоков добавление красящего пигмента (например, А1-пудры) в данном случае оказалось неприемлемым из-за взаимоналожений изображений и трудностей идентификации структур.

Результаты экспериментальных наблюдений

На созданной установке оказалась возможной демонстрация следующих важнейших эффектов, связанных с существованием адаптивных неоднородностей в подсистеме медленной эволюции: переход из режима нестационарной конвекции в режим стационарной конвекции после образования адаптивных неоднородностей (модальное подчинение); восстановление моды конвективных течений в окрестности температурных условий, соответствовавших формированию этих неоднородностей (обратимость влияния эволюционных подсистем); восстановление элементов конвективных течений, которые были навязаны системе как условный ответ на заданные температурные условия с помощью внешних сигнальных управляющих воздействий на этапе формирования адаптивных неоднородностей (эффект обучения); восстановление элементов рефлективной структуры при наличии их повреждений, нанесенных извне (регенерация поврежденных элементов).

Последовательность действий для демонстрации каждого из указанных эффектов состояла в следующем.

1. Производили однородный рассев частиц на дно сосуда, возбуждали конвекцию, подогревая сосуд до определенной температуры T_0 (время установления температурного и конвективного режимов 1 ч), убеждались в том, что при отсутствии адаптивных неоднородностей конвекция является нестационарной, т.е. имеет место непрерывная эволюция структуры течений.

Включали генератор вибрационного возбуждения для активации перемещения твердых частиц и наблюдали развитие адаптивных неоднородностей (существует оптимальная амплитуда возбуждения, обеспечивающая появление четко формленных фигур); выключали вибрацию "замораживали" неоднородности) и исследовали характер конвективных течений.

Результаты фотографических наблюдений развития адаптивных неоднородностей приведены на рис. 2, а-г. После образования явно выраженной адаптивной конфигурации в виде скоплений твердых частиц ее развитие прекращается и она таким образом запечатлевает моду конвективных

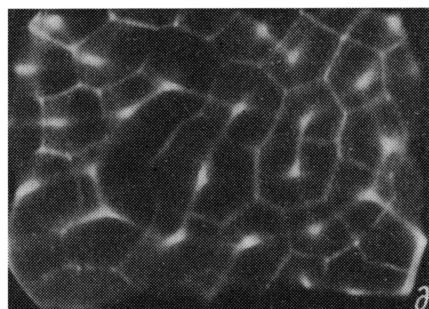
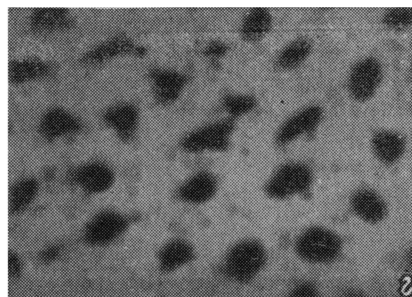
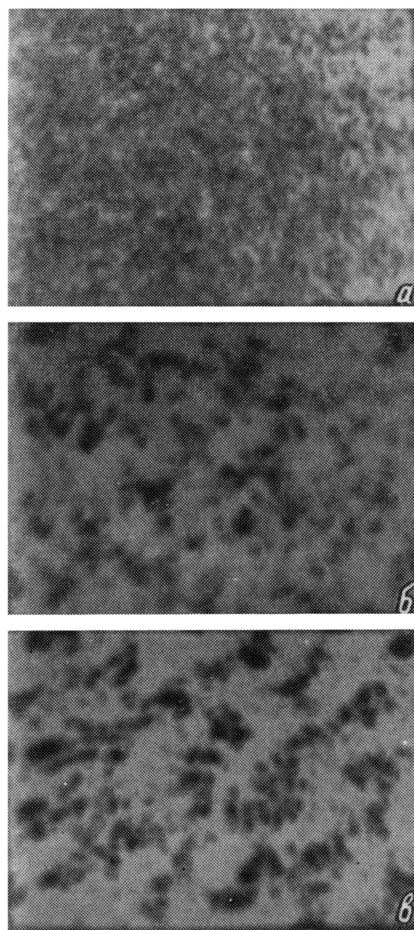


Рис. 2. Образование адаптивных неоднородностей на дне стеклянного сосуда под влиянием конвективных течений жидкости.

а — однородное начальное распределение твердых частиц; *б, в* — последовательные стадии возникновения скоплений частиц в упорядоченные конфигурации под влиянием дозированной вибрации; *г* — финальное распределение частиц; *д* — соответствующая финальному распределению структура конвективных течений: яркие светлые пятна в системе рефлексов R_A (восходящие потоки) совпадают с позициями скоплений частиц. Температура дна сосуда $T_c = 80^\circ \text{C}$.

течений. Наблюдения показали, что при наличии развитого адаптивного рельефа структура течений не испытывает эволюционных изменений, т.е. система переходит в режим стационарной конвекции. Это означает наличие модального подчинения вследствие появления эффективно действующего аттрактора. Соответствующая конфигурация, отражающая моду стационарных конвективных движений при наличии адаптивных неоднородностей (рис. 2, *г*), приведена на рис. 2, *д*. Эта конфигурация в последующем эксперименте является эталонной. Примечательно, что яркие рефлексы системы R_A совпадают с позициями скоплений частиц, т.е. имеет место согласование (дополнение) диссипативной и рефлексивной структур.

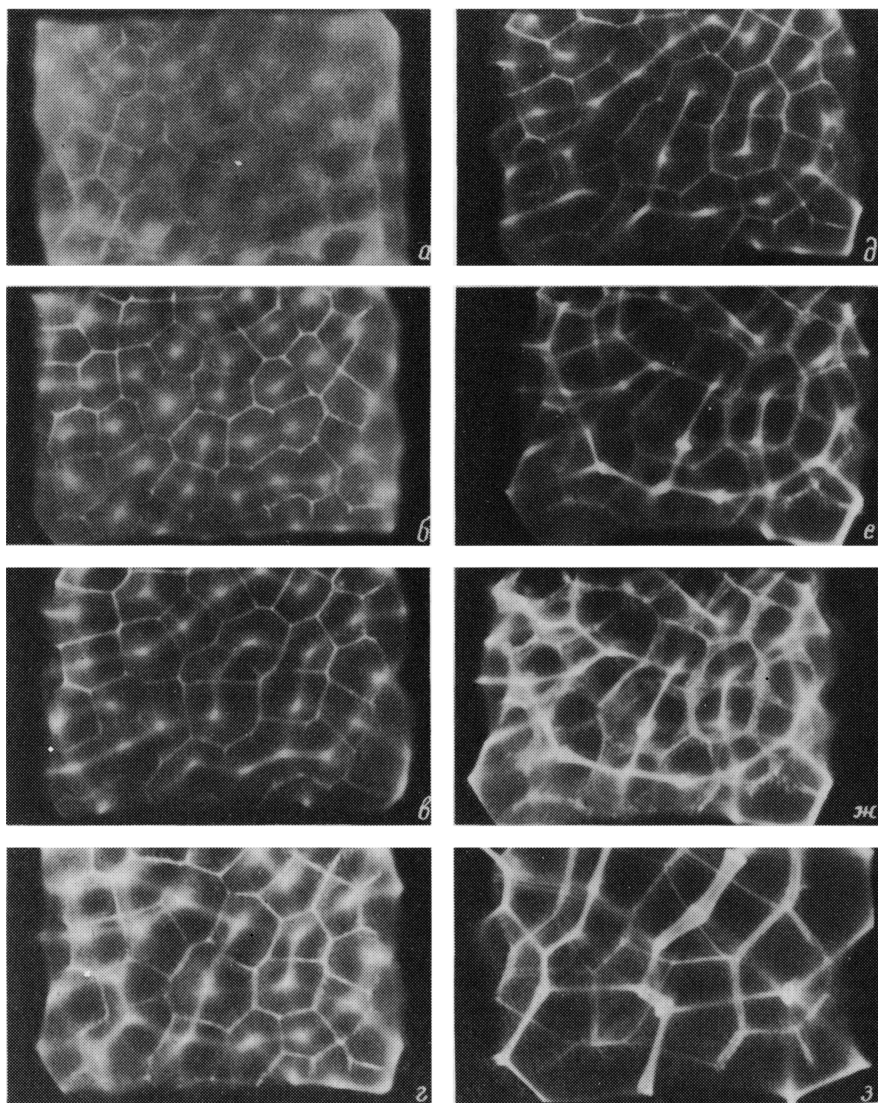


Рис. 3. Последовательные стадии изменения структуры конвективных течений при наличии адаптивных неоднородностей, обусловленные медленным повышением температуры дна сосуда.

$T = 48$ (а), 55 (б), 62 (в), 70 (г), 80 (д), 90 (е), 100 (ж), 110° С (з). Видно восстановление структуры течений при температуре $T_0 = 80^\circ$ С, соответствовавшей ранее формированию адаптивных неоднородностей (рис. 2, д). Отклонение температуры как в меньшую, так и большую стороны уменьшает меру этого соотношения.

2. Исследование повторной эволюции открытой системы с развитым адаптивным рельефом производилось из начального состояния, характеризующегося отсутствием конвекции ($Ra < Ra_c$). Медленно повышали температуру (примерно в течение 1 ч) от 55 до 120° С и наблюдали эволюционные изменения структуры течений (вибрация выключена).

Серия фотографий, характеризующая изменение течений при повторной эволюции, приведена на рис. 3. Как видно, с повышением температуры система испытывает ряд межмодальных переходов. При приближении к температуре T_0 , при которой при первичной эволюции возникали адаптивные неоднородности, наблюдается полное воссоздание элементов конвективных течений, в чем можно убедиться, сравнивая фотографии рис. 2, *д* и рис. 3, *д*. При дальнейшем повышении температуры оперативная и консервативная подсистемы вновь оказываются согласованными. При снижении температуры наблюдался гистерезис, который проявлялся в удержании модального согласования подсистем до температуры, более низкой, чем температура согласования при ее повышении.

Ширина температурного интервала, на котором наблюдается согласование эволюционных подсистем, могла варьироваться мерой развития адаптивного рельефа. Таким образом, в системе выражен естественный механизм "признания" условий, которые могут составлять сигнальные воздействия.

3. Обучение условной ответной реакции открытой двухуровневой самоорганизующейся системы было приведено в форме ассоциативного воссоздания образа по его частичному предъявлению. Для этого необходимо было использовать элементы внешнего подчинения течений. В качестве элементов были использованы фигурные тепловые экраны, располагаемые в непосредственной близости от открытой поверхности жидкости ($h' \simeq 1$ мм). Формы масок в виде буквенных символов даны на рис. 4, *а*. Присутствие маски над поверхностью жидкости "притягивает" восходящий поток, что было отмечено в предварительных пробных экспериментах.

Последовательность действий в экспериментах по обучению была такова: в условиях однородного рассева частиц возбуждали конвекцию, после установления теплового режима накладывали маску *A* и после выдержки в течение 1 мин включали дозированную вибрацию до появления следов адаптивной фигуры, после чего вибрацию выключали; замещали маску *A* маской *B* и вновь, после кратковременной выдержки, включали вибрацию до заметных преобразований адаптивной фигуры.

Эта последовательность действий была циклически повторена трехкратно, в результате чего происходило накопление информационных признаков от воздействия образов *A* и *B*.

Опрос системы производился при предъявлении части образов *A* и *B*, показанных на рис. 4, *б*, которые накладывали в соответствующие позиции и при этом производили анализ возникающих конфигураций течений в местах отсутствия элементов фигурной маски.

Как свидетельствует эксперимент, предъявление части образа (стимула) приводит к воссозданию всей структуры течений, которая была навязана системе путем демонстрации полного образа, что демонстрирует рис. 4, *в*. Смена "частичного" образа вызывает соответствующий переход в новый программный режим самосогласованных течений.

Для сравнения на рис. 4, *г* приведены конфигурации течений, которые возникают при демонстрации частичных образов, однако без создания адаптивного рельефа, обеспечивающего условные (программные) реакции на внешние стимулы.

4. Реакция консервативной подсистемы на повреждения ее элементов была изучена при следующей последовательности действий.

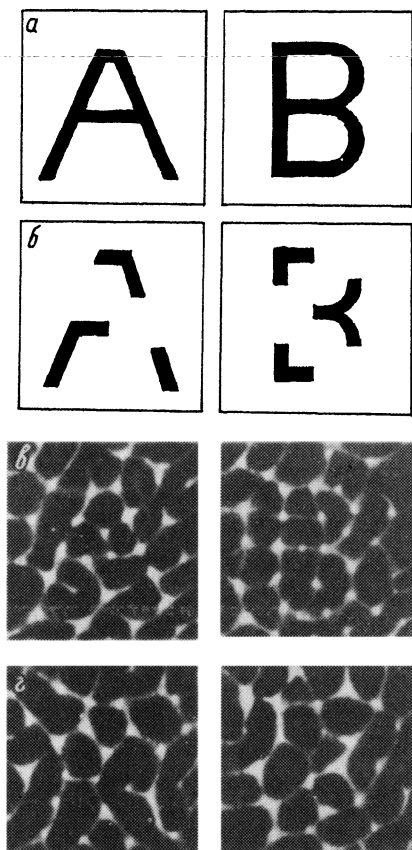


Рис. 4. Демонстрация обучения рефлексивной системы условной ответной реакции.

a — тепловые экраны в виде буквенных символов; *б* — их частичные аналоги; *в* — структуры течений, возникающие при демонстрации “частичных” образов при наличии программного адаптивного рельефа: видно подчинение потоков в форме достроения буквенных образов (воссоздание целого по части); *г* — то же, но в отсутствие программного адаптивного рельефа (до обучения).

Для выбранной температуры T_0 и выдержке при этой температуре для получения режима установившейся конвекции создавали адаптивный рельеф, используя вибрационные возбуждения. Фрагмент адаптивного рельефа, полученного с использованием графитовых частиц, дан на рис. 4,а. При выключенной вибрации производили разрушение адаптивной фигуры путем ее механического перерезания (рис. 4,б). После кратковременной выдержки, необходимой для нормализации течений, включали плавную вибрацию и увеличивали ее интенсивность.

Наблюдения за областью повреждения показали, что, начиная с некоторой пороговой интенсивности вибраций, наблюдается постепенное “залечивание” повреждения, о чем свидетельствует рис. 4,в, на котором видны лишь едва заметные отличия восстановленной структуры от исходной.

Детальное исследование явления регенерации повреждений показало, что существует критический масштаб разрушений, при превышении которого теряется способность к самовосстановлению элементов.

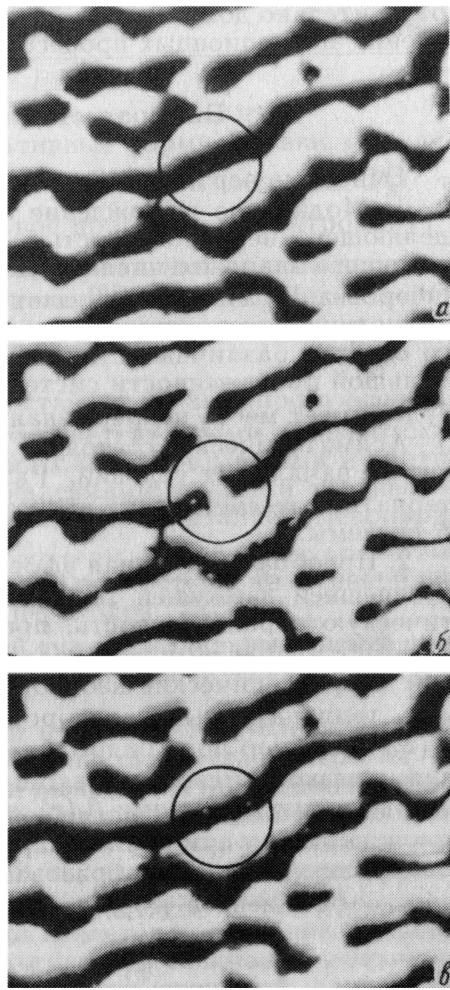


Рис. 5. Регенерация поврежденных элементов консервативной подсистемы (адаптивного рельефа).

а — фрагмент адаптивного рельефа, представляющего собой упорядоченные скопления частиц (темные области); *б* — след перерезания элемента (обозначен кружком); *в* — “залечивание” повреждения под влиянием активирующей движение частиц вибрации.

Элементы качественной теории

Открытая система с иерархической эволюционной динамикой называется рефлексивной (*R*-системой), т.е. способной к отражению внешних сил (потоков) в виде специфических адаптивных конфигураций (рефлексивных структур).

Иерархия означает существование как минимум двух взаимодействующих эволюционных подсистем со значительно различающимися временами развития (релаксации) структурных элементов (см. также [9]).

Будем именовать подсистему быстрой эволюции оперативной, а подсистему медленной эволюции консервативной. Особое значение имеют *R*-системы, в которых структурные элементы оперативной подсистемы возникают через диссипацию энергии, а консервативной — по бальцмановскому механизму. В этом случае оперативная подсистема выполняет функцию преобразования внешних сил (потоков) в их структурные коды, а консервативная — функцию памяти кодов, материализованной в виде

относительно долговжившей "конструкции" активно влияющей на направление эволюционных процессов.

Быстрая стадия первичной эволюции

Основные черты сводятся к следующему.

1. Модальное вырождение собственного значения параметра, определяющего неравновесность. В нашем случае это вырождение собственного значения числа Рэлея Ra_c . Линейная теория в приближении Обербека-Буссинеска [10] дает три вида вырождения: ориентационное, трансляционное и структурное, которые обуславливают появление целого спектра различных стационарных мод конвективных движений. При большой протяженности системы (удаленности вертикальных стенок сосуда) имеет место непрерывная диффузия фазы [11].

Асимптотическое состояние конвективного слоя в общем случае зависит от начальных условий. Развитая модальность (существование альтернативных состояний) является ценным адаптационным потенциалом R -системы.

2. Преобразовательная эффективность оперативной подсистемы. Поле внешней движущей термодинамической силы X , создающее закритическую неравновесность, преобразуется в специфические поля, связанные с элементами диссипативной структуры. Они представляют собой макроскопические неоднородности поля внешней силы $x(\mathbf{r})$ (например, температурные неоднородности); поля иной физической природы $\alpha_i(\mathbf{r})$, например поле гидродинамического давления, вызванного обтеканиями вязкой жидкостью твердых поверхностей; поля, обусловленные перекрестными явлениями $\beta_j(\mathbf{r})$, например перераспределением компонентов в жидкости при наличии градиента температуры (эффект Соре [12]).

Эффективность преобразования может быть охарактеризована набором коэффициентов $\{\xi_{x,\alpha_i,\beta_j}\}$

$$\xi_x = \frac{\langle x \rangle}{X - X_c}; \quad \xi_{\alpha_i} = \frac{\langle \alpha_i \rangle}{X - X_c}; \quad \xi_{\beta_j} = \frac{\langle \beta_j \rangle}{X - X_c},$$

где $\langle x \rangle$, $\langle \alpha_i \rangle$, $\langle \beta_j \rangle$ — осредненные амплитуды производных полей стационарной моды, $X - X_c$ — надкритическое значение внешней движущей силы.

Набор полей $x(\mathbf{r})$, $\alpha_i(\mathbf{r})$, $\beta_j(\mathbf{r})$ определяет возможные средства физического влияния в процессах модального подчинения (отбора).

Медленная стадия первичной эволюции характеризуется возникновением рефлексивной структуры в консервативной подсистеме. Для этого должны быть обеспечены чувствительность материалов базиса R -системы к полям, производимым ДС, и медленная в сравнении с временами межомодальных переходов релаксации элементов РС. Эволюция R -системы подчиняется вариационным условиям, характеризующим достижение стационарного неравновесного состояния,

$$P_S^{(D)} = \oint \sigma_S^{(D)} dV \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i=1}^k J_i^{(B)} = 0.$$

В этом сочетании, имеющем альтернативные формулировки, объединены требования минимального полного производства энтропии $P_S^{(D)}$ в оперативной подсистеме ($\sigma_S^{(D)}$ — локальное производство энтропии) [1] и баланса токов и противотоков $J_i^{(B)}$, стимулированных полями диссипативной структуры в консервативной подсистеме. Совместное выполнение названных условий выражает состояние вложения (дополнения) диссипативной и рефлексивной структур.

В общем случае $J_i^{(B)}$ может быть представлен токами, пробуждаемыми полями диссипативной структуры, и соответственными противотоками реакции, связанными с разделением масс (зарядов); токами и противотоками, связанными с перекрестными явлениями; токами и противотоками смещения, обусловленными замедленной поляризацией (деполяризацией).

При матричном строении консервативной подсистемы адаптивной реакцией может быть протекание фазовых переходов.

Развитие адаптивных неоднородностей сужает модальный спектр оперативной подсистемы и способствует затуханию хаотических, в том числе турбулентных, движений.

Быстрая стадия повторной эволюции происходит в условиях существования адаптивных неоднородностей и подразумевает перевод R -системы из условной стартовой ситуации в окрестность граничных и начальных условий, соответствовавших ранее развитию этих неоднородностей. Иными словами, имеет место воссоздание образа внешних движущих сил. Стартовой ситуацией может быть, например, докритический режим (в нашем случае это отсутствие конвективных движений).

Важнейшей особенностью этой стадии является проявление активности адаптивных неоднородностей. Эта активность означает возникновение эффекта отбора в системе мод коллективных движений. Отбор обусловлен возникновением дополнительных упорядочивающих сил, снимающих ориентационное, позиционное и структурное вырождения. Например, в наших экспериментах возникает механическая возвращающая сила при "выпадении" конвективного вала из состояния "вложения" в элемент адаптивной фигуры, обусловленная дополнительной вязкой деформацией потоков при обтекании выступа на плоской поверхности (скопления частиц на дне сосуда).

Природа сил, создающих эффект модального отбора, может быть совершенно различной и зависит от конкретных свойств R -системы. Однако экспериментальные свидетельства и соображения дополнительной диссипативной и рефлексивной структур в состоянии взаимoadaptации позволяют сформулировать эволюционную гипотезу для открытых систем с иерархической эволюционной динамикой: *в рефлексивных системах, имеющих спектр альтернативных стационарных мод коллективных движений, возникает преимущество той моды, адаптантом которой эти неоднородности являются.*

Эта гипотеза обратимости действия выражает идею создания аттракторов эволюционных траекторий, имеющую значение в создании обучае-

мых систем. Количественно эффект отбора n -моды может быть выражен коэффициентом селекции s_n , равным логарифму отношения вероятности возникновения n -моды в отсутствие и при наличии адаптивного рельефа,

$$s_n = \lg(p_{na}/p_{n0}).$$

Практическое значение эффекта

Эффект может иметь значение в различных областях знания. В технике это возможность создания систем с невычислительным (эмпирическим) обучением параллельного действия, обладающих распределенной и ассоциативной памятью. Важнейшими особенностями таких систем являются [6] преобразовательный акт — программируемый неравновесный кинетический фазовый переход в оперативной подсистеме; средство программирования (обучения) — создание системы аттракторов путем естественной физической эволюции внутренней структуры преобразовательной среды под влиянием внешних сил “стимула” и “отклика” при многократных циклических предъявлениях; оптимизация преобразовательной структуры — авторегулирование областей притяжения (коррекция) демонстрацией внешних сил, несущих признаки “отклика”; средство обеспечения надежности — матричность и элементная избыточность преобразовательной среды, что обеспечивает появление неизвестного в классических процессорных системах эффекта защиты: выгодным направлением эволюции является “залечивание” повреждений элементов консервативной подсистемы (регенерация).

В технологии это глубоко интегрированная эффе́ктов, создающая новую ситуацию — функционально-технологическое единство, т.е. становление элементов “конструкции” происходит под влиянием информационных сигналов, причем конкретная микроскопическая структура преобразовательной среды не планируется, а является результатом самоорганизации. Особое значение приобретает дендритное формообразование в создании адаптивных и резервированных межэлементных связей. Эволюционные неконтролируемые изменения технологических профилей (паразитный эффект в классических микропроцессорных системах) переходит в разряд полезных эффектов. Особое значение приобретают неравновесные сегрегационные явления [12]. При этом одинаковые внешние условия, в том числе сигнальные, дают неэквивалентность эволюции преобразовательной среды. Представляется возможным в создании сложных адаптивных систем переход от технологии твердого тела к технологии самоорганизующихся сред с иерархической эволюционной динамикой.

В биологии это развитие теории морфогенеза и филогенеза, в том числе эволюции и функционирования биологических мембран с позиций адаптивных отношений процесс-структура, осознание связи нейроструктур с информационными полями, стимулирующими их развитие. Сюда не примыкают иммунная защита и пробуждение жизни из семени.

В геологии и экологии это связь процессов геологических отложений формообразования морского шельфа с упорядоченным перемещением водных и воздушных масс [13], проблема активности осадочных пород природных форм в побуждении природных движений (геологическая и экологическая память); критические экологические напряжения [14].

В гнестенологии это проблема отражения в окружающем нас мире, всепроникновение ассоциативной реакции ("целое по части"), особое состояние материального мира, характеризующее адаптивным отношением процесс ↔ вещество.

Список литературы

- [1] Пригожин И., Николис Г. Познание сложного. М.: Мир, 1990. С. 63.
- [2] Хакан Г. Синергетика. М.: Мир, 1985. 420 с.
- [3] Климонтович Ю.А. Статистическая физика. М.: Наука, 1982. С. 104-107.
- [4] Кальнин А.А., Лучинин В.В. // Электронная пром-сть. 1983. № 8. С. 5-11.
- [5] Кальнин А.А. // Биофизика. 1984. Т. 29. Вып. 1. С. 117-121.
- [6] Кальнин А.А. // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы / Под ред. А.А.Васенкова, Я.А.Федотова. № 10. М.: Радио и связь, 1989. С. 95-110.
- [7] Zulike Ch., Ebeling W., Schimansky-Geier // Bio. Systems. 1989. Vol. 22. P. 261-272.
- [8] Conrad M. // Communications ACM. 1985. Vol. 28. N 5. P. 464-480.
- [9] Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. С. 253.
- [10] Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности / Под ред. Х.Суинни, Дж.Голлаба. М.: Мир, 1984. 344 с.
- [11] Берже П. // Синергетика / Под ред. В.Б.Кадомцева. М.: Мир, 1984. С. 220-233.
- [12] Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964. 456 с.
- [13] Рундквист Д.В. // Самоорганизация в природе и обществе. Тез. докл. Всесоюз. конф. Л.: Наука, 1988. С. 118-120.
- [14] Свиричев Ю.М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. М.: Наука, 1987. 368 с.

С.-Петербургский государственный
электротехнический университет

Поступило в Редакцию
6 июля 1992 г.