01

О теории динамического соответствия

© Г.Е. Скворцов

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 9 октября 1998 г.)

Обсуждается общая теория динамического подобия, которая включает процессы большой неравновесности и рассматривает обобщенное подобие процессов. Формулируются основные законы теории: меры действия и динамического соответствия. Предлагается основной метод динамического соответствия — объект-процессный классификатор. Дается первоначальное изложение основных разделов теории. Указываются возможные эффекты и описывающие их зависимости.

Теория динамического подобия является непременным первым шагом анализа процессов. Имеющаяся теория [1] охватывает область умеренной неравновесности и не распространяется прямым образом на процессы сильной неравновесности, поскольку в этой области, вообще говоря, подобие процессов отсутствует. Необходима обобщенная теория, дающая достаточно общие, простые и удовлетворительно описывающие процессы, полуфеноменологические выражения основных зависимостей для разнообразных систем.

Построение теории динамического соответствия (ДСТ), охватывающей область сильной неравновесности, — актуальная проблема, которой и посвящена данная работа. Динамическое соответствие означает установление сходства процессов по тем или иным признакам: сходства динамических уравнений, режимов, механизмов, аналитического вида основных зависимостей. Наиболее общими признаками служат закономерности, однако для конструктивности им необходимо аналитическое обеспечение.

В данной работе осуществляется объединение фрагментарных результатов: законов, принципов и методов, полученных автором [2–7]. Формулируются законы меры действия и динамического соответствия (ДС), даются их следствия и применения. Для определения ДС, предсказания новых эффектов и закономерностей применяется оригинальная система — объект-процессный классификатор. В качестве раздела ДСТ для режимов разной степени неравновесности (регулярных, резонансных, структурных переходов) дается общий вид основных закономерностей.

1. Исходные положения

Рассматриваются процессы широкого диапазона неравновесности в разнообразных системах, обусловленные различными воздействиями. В ходе процессов система изменяет свою структуру, так что приходится иметь дело с системой-процессом (динамичной системой).

а) Структуру систем образуют структурно-кинетические элементы (ЭСК) и связи–взаимодействия между ними.

Структура, как известно, имеет иерархическое строение: ЭСК первого уровня состоит из ЭСК второго уровня и т. д. Структуре, как правило, присущи стохастические свойства, и далее используются средние характеристики ЭСК. Примем, что структура имеет s_m уровней и описывается набором величин

$$\{n_s, \mu_s, \lambda_s, \tau_s, v_s, \varepsilon_s, q_s\}, \quad s = 1, 2, \dots, s_m, \qquad (1)$$

n_s — плотность, μ_s — масса, λ_s и τ_s — характерные размер и время ЭСК, v_s — среднеквадратичная скорость, ε_s — энергия взаимодействия (связи), q_s — заряд и дополнительные признаки ЭСК уровня s; эти характеристики зависят от внешних условий и интенсивности воздействий.

Для рассматриваемого случая из имеющейся полной иерархии выбирается в качестве основной структура, согласованная с масштабами и энергетикой процесса. В зависимости от диапазона их значений для физических систем исходными ЭСК могут быть элементарные частицы, атомы, молекулы, квазичастицы, флуктоны разного рода, различные макроскопические образования.

Структура определяет основные свойства динамичной системы и отражается в динамических уравнениях. В случае классической, слабонеравновесной, теории структура представлена посредством кинетических коэффициентов. Для сильнонеравновесной теории, супергидродинамики [7–9], вследствие структурной обусловленности уравнения содержат нелинейные функциональные зависимости с запаздыванием и нелокальностью.

б) Для изучения и сопоставления процессов в различных системах необходимо иметь набор подходящих, достаточно универсальных мер действия (МД), определяющих динамическое состояние системы. Такой набор получается на основе входящих в общие динамические уравнения макроскопических величин $\{a_n(x,t)\}$ [7,8] с использованием надлежащих структурных характеристик динамичной системы. При этом формируются подходящие комплексы с учетом естественных условий: положительность, тенденция возрастания с увеличением фактора действия, "нормированность на переход".

Меры действия представляют собой отношения факторов действия $g(x,t)$ и соответствующих характеристик системы — структурных факторов $s[g]$

$$G = \frac{g}{s[g]}: \quad A_n = \left|\frac{a_n - a_{n0}}{a_{ns}}\right|:$$

$$C = \left|\frac{\rho_n - \rho_{n0}}{\rho_{ns}}\right|, \quad V = \left|\frac{u_n - u_{n0}}{u_{ns}}\right|,$$

$$E = \left|\frac{e_n - e_{n0}}{\varepsilon_s}\right|, \quad N = \left|\frac{\dot{e}_n - \dot{e}_{n0}}{\dot{\varepsilon}_s}\right|,$$

$$J = \left|\frac{j_n - j_{n0}}{j_{ns}}\right|, \quad F = \left|\frac{f_n}{f_s}\right|, \dots, \tag{2.1}$$

$$H = \tau_s\big|\partial_t \ln|a_n|\big|, \quad L = \lambda_s\big|\partial_x \ln|a_n|\big|, \dots, \tag{2.2}$$

$a_{n0}(x,t)$ — определяющие величины процесса сравнения; $a_{ns}(x,t)$ — соответствующие структурные характеристики; ρ_n — плотности; u_n — скорости; $e_n, \dot{e}_n, f_n$ — энергии, мощности и силы воздействия на ЭСК; j_n — поток величины a_n; $\dot{\varepsilon}_s/\tau_s$; $j_{ns} \sim v_{ns}a_{ns}$; $f_s \sim \mu_s v_s/\tau_s$.

Учет особых режимов воздействия — резонансов и структурных переходов (СП) осуществляется посредством использования мер действия вида

$$R_G = \sum_m \frac{b_m}{\left[1 + k_m^{\pm}\left(\frac{G - G_{mc}}{G_{mc}}\right)^{\gamma_m^{\pm}}\right]}, \tag{3}$$

G_{mc} — пороговые значения G_m; индексы $\pm$ указывают значения величин справа и слева от порога (для резонансов без качественного изменения структуры $k_m^- = k_m^+$, $\gamma_m^{\pm} = 2$).

Совместно с величинами (2), (3) следует использовать отнесенные к исходной структуре факторы действия и структуры

$$G_0(x,t) = \frac{g}{s_0}, \quad S = \frac{s[g] - s_0}{s_0}, \quad s_0 = s[0]. \tag{4}$$

Величины (1)–(4) составляют полный набор МД.

Согласно природе факторов действия, выделяются активные МД (2.1), с которыми связан приход или уход ресурсных величин (масса, импульс, энергия), и масштабные МД (2.2), которые определяют отношения временны́х и пространственных внутренних и внешних масштабов.

Следует указать, что использование меры действия позволяет рассматривать более широкий круг систем и процессов сравнения, чем в рамках степени неравновесности (СНР), которая измеряет отклонение от квазиравновесия. Это обстоятельство имеет существенное значение для процессов в химии и биологии, а также при воздействии на СП. Например, согласно основному закону живых систем [10], внешние воздействия уменьшают присущую им неравновесность (МД растет, а СНР уменьшается). Показательным является определение СНР для процесса ионного переноса через мембраны [11].

Содержание этого раздела в концентрированной форме представляет закон меры действия: "результат воздействия на систему отражает набор универсальных мер действия; мера действия выявляет взаимообусловленность структуры и действия".

Вариантом закона МД для биологических систем является закон исходного уровня [12].

в) Полный и универсальный набор МД и система законов [2–7] служат основой закона динамического соответствия: "процессы в разнообразных системах имеют общее, состав и степень которого определяет система мер действия".

С учетом зависимости МД от структуры можно считать этот закон динамическим обобщением известного равновесного закона подобия структуры и свойств (периодический закон Менделеева, закон гомологических рядов Вавилова и др.).

Для конструктивного сопоставления процессов следует использовать принцип динамического соответствия, который указывает признаки и методы сравнения процессов. Основными признаками являются: сходство уравнений, режимов, функциональных зависимостей определяющих величин, механизмов, эффектов. Основным методом выявления ДС служит объект-процессная классификация.

г) Этот метод представляется в виде объект-процессного классификатора (ОПК), который является упорядоченной системой концентрированных сведений о классах объектов, возможных процессах, обусловленных воздействиями разного рода, и их закономерностях. Для объектов физики с одним воздействием и тремя МД (амплитудной A и масштабными H и L) ОПК имеет вид таблицы с осью классов объектов (…, молекулы, поля, газы и т. д.) и двумя осями мер действия A и $H \simeq L$.

На динамической плотности ОПК располагаются основные сведения из таких областей: равновесная структура и свойства класса объектов, $G = 0$; термодинамика, $A < 1$, $H = 0$; классическая гидротермоэлектродинамика, $A < 1$, $H < 0.2$; синергетика, $A \leqslant 1$, $H < 0.2$; супергидродинамика, $A \leqslant 1$, $H < 10$; резонансные режимы, $A < 0.2$, $H = 1$; структурный переход, $A = 1$; аномальные режимы, $A_0 \gtrsim 1$; гидродинамика-2; синергетика-2 и т. д. Разделы с номером два содержат динамичные системы, получающиеся из указанных систем в результате сверхпорогового воздействия; например, "гидродинамика-2" означает теорию турбулизованной или кипящей жидкости.

Концентрированные сведения о процессах включают основные эффекты, управляющие законы и закономерности, вид уравнений.

Система ОПК будучи своеобразным динамическим аналогом таблицы Менделеева, обладает рядом существенных свойств. Прежде всего отметим универсальное классификационное свойство, которое устанавливает соответствие между классами процессов и упорядочивает режимы процессов. Показательный пример дает анализ электростатического диспергирования жидкостей [13]. Важнейшим является прогностическое свойство, которое позволяет предсказывать новые эффекты и закономерности. Например, удается предсказать многообразие эффектов СП (в частности, структурные переходы полей), аномальные эффекты и эффекты "окон квазиравновесности" [14].

На основе прогностического свойства можно утверждать, что явление аномальной релаксации, обнаруженное в газах [15], имеет место в жидкостях и твердых телах.

Используя принцип ДС и ОПК, можно охарактеризовать синергетику и супергидродинамику многонуклонного ядра, макромолекулы, по́ля.

2. Свойства и эффекты структурной обусловленности

Рассмотрим некоторые существенные свойства динамического соответствия и эффекты, обусловленные структурой.

а) Вид МД (2) приводит к ряду полезных заключений. Равенство МД для процессов с одинаковым фактором действия в двух системах (или модификациях одной) означает их полное соответствие — подобие

$$G_1 = G_2, \quad \frac{g_1}{g_2} = \frac{s_1[g_1]}{s_2[g_2]} \sim \frac{s_{10}+s_{11}g_1}{s_{20}+s_{21}g_2}; \qquad (5),(6)$$

последнее соответствие переходит в равенство при $g_1 \sim g_2 \to 0$. Из (5), (6) следует, что с меньшим воздействием можно получить одинаковый результат для системы, имеющей пропорционально меньший структурный фактор. Меньшие значения структурного фактора (скорости звука, энергии связи, обратных времен релаксации и структурных размеров) соответствуют динамическим состояниям, при которых система имеет большее число степеней свободы.

Согласно (2), при равных значениях g более неравновесными оказываются динамичные системы с бо́льшим числом степеней. Этот вывод объясняет повышенную неравновесность газа возбужденных частиц, турбулентной жидкости, полимерных систем.

В пределе малых G различные системы целесообразно сравнивать, используя меру "потенциальной неравновесности" $s_{12} = s_{20}/s_{10}$ (5), которая имеет очевидную связь с числом степеней и сложностью систем. По существу эта мера была использована для классификации жидких сред в [8].

б) Условие "нормировки на переход" МД означает, что равенство G единице отражает закон границы качества и определяет ее

$$g_c \approx s[g_c]: \quad \Delta\rho \approx \rho_c, \quad \Delta u \approx v_s,$$

$$\Delta e \approx \varepsilon_s, \quad \Delta j \approx j_s, \ldots; \qquad (7)$$

$$|\partial_t \ln \Delta a| \approx 1/\tau_s, \quad |\partial_x \ln \Delta a| \approx 1/\lambda_s, \ldots. \qquad (8)$$

Первое условие (7) определяет границу качества концентрации — фазовый переход, границу воспламенения. Второе условие при v_s, равной скорости звука, как известно, соответствует возникновению ударных волн (УВ). Третье условие означает дезинтеграцию ЭСК уровня s: разрушение, диссоциация, аномальная релаксация [2]. Четвертое условие указывает критический поток, при достижении которого образуется новая структура и, в частности, диссипативная структура, рассматриваемая синергетикой.

Первое условие (8) соответствует частотному резонансу; оно также дает с учетом принципа Шателье простейшее релаксационное уравнение $d_t\Delta a = -\Delta a/\tau_s$. Второе условие указывает длину волны с наибольшим относительным поглощением. Эти же условия можно рассматривать как оценки параметров образующихся структур в зависимости от скорости или градиента воздействия. Например, при охлаждении расплава со скоростью

$$\left|\partial_t \ln\left|\frac{T-T_c}{T_c}\right|\right|,$$

T_c — температура затвердевания, первое условие дает оценку величины λ_s образующихся ЭСК

$$\lambda_s \simeq v_s/|\partial_t \ln \Delta T|, \qquad (9)$$

v_s — скорость границы затвердевания.

В списке мер действия (2) не указаны градиентные аналоги скоростного и мощностного МД; они получаются перемножением МД (2.1) с градиентной МД (2.2). Например, условие возникновения турбулентности имеет вид [16]

$$V_y/L_y = \frac{y_*^2}{\nu}\frac{dv_x(y)}{dy} \approx 1, \qquad (10)$$

y_* — расстояние от стенки в поперечном к потоку направлении, где зарождаются турбоны.

в) Структурные характеристики, определяющие МД, достаточно полно представлены в выражениях неравновесных кинетических коэффициентов (НКК). Общие выражения НКК [8,9], будучи включены в теорию ДС, дают возможность выявлять соответствие НКК, определять структурные характеристики и указать целый ряд структурно-кинетических эффектов.

Используем общие выражения НК вязкости и проводимости [9] и получим из них соответствующие оценочные зависимости

$$\eta \sim \frac{\mu_e v_T}{\sigma_e(1-\gamma)\left[Z+1+\frac{\tau_2}{\tau_1}+F\right]},$$

$$\sigma \sim \frac{n_q q^2}{n\mu_q v_T \sigma_e[\ldots]}, \qquad (11)$$

$\tau_1 = (n_e v_T \sigma_e)^{-1}$, $\gamma \simeq \pi\lambda_2^3 n_e$, $Z \equiv z + ikV$, $F = \frac{\tau_1 f}{\mu_1 v_T}$, $\sigma_e(T,F) \sim T^{-r}$ — сечение столкновения ЭСК.

Как явствует из (11), особенности поведения коэффициентов обусловлены особенностями структурных характеристик. Таковыми являются существенно меньшие или бо́льшие (по сравнению со средней величиной для данного класса систем) значения, а также резкое изменение (скачок) характеристик.

Так, стремление к нулю частоты столкновений при бо́льших энергиях приводит к эффекту уменьшения темпа релаксации согласно зависимости $\exp(-t/\tau_s)^\alpha$, $\alpha < 1$ [17]. Такая "растянутая" экспонента описывает релаксацию в неупорядоченных системах (стеклах) [18].

В случае ударных волн (УВ) имеются данные о резком увеличении времени релаксации (при предшествующем его уменьшении) с ростом скорости УВ [19]. По этому признаку соответствующий режим $u \approx 9$ km/s в воздухе следует признать аномальным. Он близок к указанному в [20] режиму неустойчивости УВ.

Резкое изменение массы ЭСК обусловливает различные неравновесные эффекты. Так, быстрая диссоциация газа приводит к уменьшению вязкости согласно (11) $\eta \sim \mu^{1/3}$. Эффект Ганна, как известно, обусловлен резким увеличением эффективной массы $\mu(E)$ при $E > E_c$.

3. Общее подобие неравновесных зависимостей

Используя принцип ДС и общие выражения определяющих соотношений [8,9], обсудим вопрос о подобии формы основных неравновесных зависимостей в широком диапазоне изменения МД. Будем рассматривать основные соотношения, которые отражают реакцию системы на воздействия: отклик системы, соотношения (законы) релаксации, переноса, сопротивления

$$R_\alpha = \Phi_\alpha[G], \quad G = (A, H, L, F), \tag{12}$$

$\Phi_\alpha[.]$ — нелинейные операторы функционального типа, общие выражения которых даны в [8].

а) При малых МД ($G < 0.2$) соотношения (12) принимают вид линейных зависимостей

$$\Delta R_\alpha = \Phi_\alpha[G] - \Phi_\alpha[0] \simeq \sum_\beta K_{\alpha\beta} G_{0\beta}. \tag{13}$$

Эти зависимости пригодны для любых систем и представляют собой линейный отклик, законы Ома, Фурье, Стокса и т.д. Коэффициенты восприимчивости в (13) определяются структурными характеристиками систем в равновесии.

В случае малых воздействий ($G_0 \ll 1$) не сильно неравновесные состояния, например на структурный переход (СП), зависимости (12) принимают (скейлинговый) вид

$$\Delta R_\alpha \simeq \sum_\beta K_{\alpha\beta} G_{0\beta}^{r_\beta}, \quad r_\beta < 1. \tag{14}$$

б) Для режимов $G_A < 0.2$, $H, L > 0.3$ зависимости (12) сводятся к линейным функционалам — сверткам по времени и пространству, которые в лаплас–фурье-представлении принимают вид

$$\Delta R_\alpha \simeq \sum K_{\alpha\beta}(z, k, \Pi) G_\beta(z, k), \tag{15}$$

$z \to \tau_s \partial_t = H$, $ik \to \lambda_s \nabla = L$.

Выражения неравновесных восприимчивостей $K_{\alpha\beta}(z, k)$ получены в виде, пригодном для построения полуфеноменологической теории для газа при любых z и k [8,9]. Отметим, что основным при этом было получение асимптотических зависимостей для $|z, k| \gg 1$, которые необходимы для построения эффективных интерполяционных выражений широкого диапазона.

в) Укажем асимптотический вид НКК. Как вытекает из анализа ряда задач, имеем

$$K(z, ik) \simeq \frac{c_1 + ic_2}{c_3 z^{1+\alpha} + |k|^{1+\gamma}}, \tag{16}$$

$|\alpha, \gamma| < 0.5$ (как правило).

В случае линейной теории без СП $\alpha = \beta = 0$ [8,9]. Для сверхпроводников второго рода в стационарном случае $\gamma = 0$ (отсутствие модуля у k в [21] приводит к неверному виду постоянной проникновения поля).

г) Используя соответствие $k \to L$, удается применить результат (16) к нелинейному случаю. В задаче о простом сдвиге [22] сдвиговая вязкость имеет вид

$$\eta = c\left|\frac{\lambda_1}{v_1}\partial_y u_x\right|^{-\frac{4}{3}}, \quad \text{т.е.} \quad \gamma = \frac{1}{3}.$$

В теории турбулентности, построенной на рациональной основе [23], для $\mathrm{Re} \sim 10^6$ турбулентная вязкость убывает с ростом градиентной МД (вид которой получен) с показателем 2/3, т.е. $\gamma = -(1/3)$. Известная феноменологическая теория Кармана при $\mathrm{Re} > 10^8$ дает $\gamma = 0$.

д) Для МД активного типа достаточно универсальные выражения можно получить только при ограничении пределом устойчивости структуры. В частности, для проводимости в постоянном электрическом поле из общего выражения при $\sigma_e \sim (v_T/v_0)^{-2s}$, n_e – const получается зависимость [24]

$$\sigma(F) \simeq cF^{-(1+\gamma)}. \tag{17}$$

В случае, если границы СП значительно разделены $G_{01} \ll G_{02} \ll G_{03}, \ldots$, на общей основе получается

$$K(G) \sim c_n G_0^{-(1+\gamma_n)}, \tag{18}$$

$|\gamma_n \leqslant 1|$.

Этот результат можно обратить, т.е. сделать заключение о наличии СП исходя из факта существенного изменения степени на малом интервале значений G_0.

е) Представляет интерес описание режимов, соответствующих значениям $G_{A0} < 1.3$, $G_A \lesssim 1$; $H, L < 0.2$. Достаточно универсальные зависимости для этого диапазона даны в [5] и на их основе рассмотрен ряд конкретных задач.

В рамках теории ДС целесообразно использовать более общее и достаточно простое, интерполяционное выражение, согласованное со всеми законами неравновесности, реакции систем и закономерностями СП [2–6]

$$\Phi(x) = \frac{b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0}{c_3x^3 + c_2x^2 + c_1x + c_0} \equiv \frac{B(x)}{C(x)}, \quad x = G_0. \tag{19}$$

Это однофакторное выражение с семью параметрами описывает основные режимы: линейный, нелинейный (монотонный), резонансный, СП второго и первого рода. Оно пригодно для разнообразных систем (от атомных до космических) и было апробировано на десятках задач.

Для каждого из режимов зависимость (19) можно упростить, полагая подходящие коэффициенты нулями и специализируя их вид. Например, для резонанса имеем $b_3 = b_2 = b_1 = c_3 = 0$, $c_1 = -2x_c c_2$, $c_0 = c_2 x_c^2 + \varepsilon^2$, x_c, ε — параметры лоренциана.

Особенности поведения функций отражают нули производной, которые для (19) определяются числителем

$$\Phi'(x) = \frac{\sum\limits_{n=0}^{4} d_n x^n}{C^2(x)} \equiv \frac{D(x)}{C^2(x)},$$

$$d_4 = b_3 c_2 - b_2 c_3, \quad d_3 = 2(b_3 c_1 - b_1 c_3),$$
$$d_2 = 3(b_3 c_0 - b_0 c_3) + b_2 c_1 - b_1 c_2,$$
$$d_1 = 2(b_2 c_0 - b_0 c_2), \quad d_0 = b_1 c_0 - b_0 c_1. \qquad (20)$$

В общем случае $\Phi(x)$ — немонотонна и уравнение $D(x) = 0$ имеет два или четыре вещественных корня. Если имеется четыре положительных корня, то $D(x)$ представляется в виде

$$D(x) = d_4 \prod_{n=1}^{4} (x - x_n), \quad x_n > 0.$$

В случае, когда корни достаточно разделены, они приближенно равны

$$x_n \approx -\frac{d_{n-1}}{d_n}, \qquad (21)$$

x_n — границы двух последовательных СП первого рода.

Из положительности $\Phi(x)$ вытекает

$$d_{0,2,4} > 0, \quad d_{1,3} < 0 \to b_3 c_2 > b_2 c_3, \quad b_3 c_1 < b_1 c_3. \qquad (22)$$

Подобные ограничения упрощают выбор параметров.

Если два корня совпадают, то имеем СП второго рода или критическую точку (и соответствующие ограничения на параметры). В случае $c_3 = b_0 = 0$ для двух линейных режимов $x \ll 1$ и $x > x_m$ — максимальный корень, при условии $b_1/c_0 > b_3/c_2$ восприимчивость системы в результате СП увеличивается (при обратном условии уменьшается) и можно сказать, что имеем активирующий (дезактивирующий) СП. Приведенный частичный анализ демонстрирует благоприятные возможности использования выражения (19).

ж) Общая функциональная форма определяющих соотношений, полученная на основе операторных выражений [8], в согласии с принципом динамического соответствия имеет вид

$$J_n[G] = \sum_{l,s,m} \int_0^t dt' \int dx' \varphi_{nm}^{ls}(\Delta t, \Delta x; G, G')$$
$$\times \exp\left[-H_{nm}^s\left(\frac{|\Delta t|}{\tau_{nm}^s(G')}\right) - L_{nm}^l\left(\frac{|\Delta x|}{\chi_{nm}^l(G')}\right)\right] G'_m \qquad (23)$$

$\Delta t = t - t'$, $\Delta x = x - x'$; $G' \equiv G(t', x')$; φ, H, L — функции, характер поведения которых можно указать для малых и больших значений аргументов.

Принцип ДС в отношении (23) означает, что это выражение при его специализации должно соответствовать всем имеющимся теоретическим и опытным данным. Для всех рассмотренных выше режимов такое соответствие может быть продемонстрировано. Однако большой объем опытных данных, в частности по динамике (реологии) полимеров, предстоит сопоставить и описать, используя функциональное выражение (23).

4. Обсуждение результатов

Результаты данной работы и предыдущих [2–8] позволяют расширить теорию динамического подобия, изложенную в замечательном труде С.С. Кутателадзе [1], и включить в анализ процессы большой неравновесности. Обсудим вкратце основные теории динамического соответствия, сопоставляя результаты работы и содержание [1]. Такое сопоставление оказывается весьма поучительным и плодотворным. Теорию, как известно, составляют четыре основные части: закономерности, модели, методы и демонстрационные задачи. Главная задача теории ДС — отыскивать в многообразии процессов общее и отражать это общее посредством зависимостей.

1) Закономерную основу теории ДС составляют постулат единства природы, система законов и закономерностей [2–7], другие известные законы, а также принцип инвариантности вида основных зависимостей от системы мер. В [1] используется традиционная основа динамического подобия в виде известных уравнений гидротермоэлектродинамики, описывающих умеренно неравновесные процессы.

2) Модели ДСТ охватывают наиболее общие механизмы процессов, а также аналитические модели описания процессов. Общие механизмы процессов умеренной неравновесности предоставляет синергетика. Аналитические модели дает анализ размерностей, асимптотические зависимости процессов, а также достаточно общие, согласованные с системой законов аналитические выражения, подобные содержащимся в разделе 3. В [1] даются виды аналитических моделей разного рода. В частности, зависимость для теплопроводности металлов (13), (17) согласуется с выражением (19) при $b_3 = b_2 = b_0 = 0$, $b_1 = 3$, $c_2 = c_1 = 0$, $c_3 = 2$, $c_0 = 1$. Заметим, что, согласно соответствию между СП и экстремумом определяющей зависимости, можно констатировать наличие при $\bar{\lambda}_{\max}, \bar{T} \approx 1$ структурного перехода.

3) Методы ДСТ частично содержатся в [1]. Основным методом отражения общности процессов является представленный в разделе 1г объект-процессный классификатор. Подходящим методом аналитического описания является получение все более общего вида основных зависимостей, согласованного с закономерностями. Примерами такого подхода служат выражения (19), (23).

4) Сравнение общей модели структуры, используемой автором [2–7], и соображений о выборе структуры, а также примеров выбора, содержащихся в [1], свидетельствует о близости понимания этого вопроса и целесообразности применения общей модели для ДСТ.

5) Очень интересные демонстрационные задачи ДСТ в большом числе даны в [1]. Дополнением служат задачи, рассмотренные в [2–9]. На примере задачи о кипении жидкости [1], рассмотренной с точки зрения описания СП [5], наглядно проявляется плодотворность двух подходов.

Список литературы

[1] *Кутателадзе С.С.* Анализ подобия и физические модели. Новосибирск: 1986. 263 с.
[2] *Скворцов Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 17. С. 15–18.
[3] *Скворцов Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 6. С. 85–89.
[4] *Скворцов Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 7. С. 23–27. Там же. Вып. 10. С. 17–21.
[5] *Скворцов Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 3. С. 80–85. Там же. Вып. 19. С. 7–12.
[6] *Скворцов Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 1. С. 81–86.
[7] *Скворцов Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 22. С. 7–11.
[8] *Скворцов Г.Е.* // Вестник ЛГУ. 1979. № 3. С. 94–98.
[9] *Скворцов Г.Е.* // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. Вып. 8. С. 502–515. Там же. 1975. Т. 68. Вып. 4. С. 956–973.
[10] *Бауэр Э.С.* Теоретическая биология. Будапешт, 1982. 295 с.
[11] *Пастушенко В.Ф., Шиндлер Х., Чизмаджев Ю.А.* // ДАН СССР. 1991. Т. 320. № 6. С. 1491–1495.
[12] *Васильев Н.В., Коляда Т.И.* // Живые системы под внешним воздействием. СПб., 1992. 440 с.
[13] *Ширяева С.О., Григорьев А.И., Подвальный Л.С.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 4. С. 36–41.
[14] *Иванов А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 8. С. 1–7.
[15] *Мишин Г.И., Бедин А.П., Ющенкова Н.И.* и др. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 11. С. 2315–2324.
[16] *Петухов Б.С., Поляков Н.Ф., Ципуляев Ю.В.* // ТВТ. 1978. Т. 16. № 5. С. 987–990.
[17] *Скворцов Г.Е.* // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. Вып. 12. С. 2054–2065.
[18] Phase Transitions and Relaxation in Systems with Competing Energy Scales. Norway, 1993. 452 p.
[19] *Железняк М.Б., Мнацаканян А.Х.* // ТВТ. 1968. Т. 6. № 3. С. 390–398.
[20] *Барышников А.С., Скворцов Г.Е.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2483–2485.
[21] *Туров Е.П.* Материальные уравнения электродинамики. М., 1983. 156 с.
[22] *Santos A., Garzo V., Brey J., Dufty J.* // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. P. 3971–3974.
[23] *Скворцов Г.Е.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 3. С. 62–69.
[24] *Перевозников Е.Н., Скворцов Г.Е.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 9. С. 1–8.