

01

## Закономерности и эффекты структурной обусловленности

© Г.Е. Скворцов

Санкт-Петербургский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию 28 ноября 1996 г.

В работе проведено обсуждение закона структурной обусловленности неравновесности.

В статье [1] были представлены четыре основные закономерности процессов большой неравновесности. Применения этих закономерностей к широкому кругу систем и процессов продемонстрировали их новые стороны и возможности. Соответственно этому первоначальные закономерности модифицировались и, по сути, приобрели статус законов.

В данной работе рассматривается первый из них — закон структурной обусловленности неравновесности. Обсуждаются различные его проявления: закономерности и структурно-обусловленные эффекты.

Характерной особенностью большой неравновесности процессов является существенная зависимость их и возникающих эффектов от структуры и ее изменений в ходе процесса. Это обстоятельство отражает символическая формулировка закона структурной обусловленности неравновесности "неравновесность структурно обусловлена".

1. Структуру системы образуют структурно-кинетические элементы и связи между ними. В исходном, упрощенном представлении структура характеризуется такими величинами: (для структурно-кинетических элементов) масса  $m_e$ , размер (диаметр)  $\lambda_1$ , среднеквадратичная скорость  $v_T$  (энергия хаотического движения  $\varepsilon_T = m_e v_T^2 / 2$ ), энергия связи  $\varepsilon_1$ , "время жизни" (релаксации)  $\tau_1$ , заряд  $q_e$ ; (для связей) среднее расстояние между структурно-кинетическими элементами  $\lambda_2$ , время между "столкновениями"  $\tau_2$  ( $\tau_2 v_T = \lambda_3$  — длина "свободного пробега"), энергия взаимодействия  $\varepsilon_2$ . Эти средние структурные характеристики зависят от внешних условий, интенсивности воздействий и являются функциями координат и времени.

Характеристики структуры используются для оценок, определения подобия процессов, классификации систем и выявления структурно-обусловленных эффектов.

2. На основе общих динамических уравнений для определяющих макроскопических величин  $a_n(xt)$  [2], сформировав из структурных характеристик соответствующие структурные величины  $a_{ns}(xt)$ , получим аналогично [3] полную систему подходящих безразмерных определяющих величин  $A_n = (a_n - a_{ne})/a_{ns}$ ,  $a_{ne}$  — равновесное значение  $a_n$ .

Используя систему подходящих определяющих величин и дополняя ее надлежащим образом с учетом естественных условий (таких как положительность, "согласование с воздействием", соответствие известным критериям подобия, "нормированность перехода"), получаем выражения для набора степеней неравновесности. Они имеют вид безразмерного произведения факторов действия  $g$  и соответствующих им структурных факторов  $s[g]$ :

$$|gs| : |A_n| : V = \left| \frac{u}{v_T} \right|, \quad E_i = \left| \frac{e}{\varepsilon_i} \right|, \quad P_i = \left| \frac{\dot{e}}{\dot{\varepsilon}_i} \right|, \quad (1.1)$$

$$J_n = |(j_n - j_{ne})/j_{ns}|, \dots;$$

$$F_i = \left| \frac{\tau_i f}{m_e v_T} \right|, \text{res}_n = \left[ 1 + k_n^\pm \left| \frac{a_n - a_{nc}}{a_{nc}} \right| \right]^{-1}, \text{res}F_i = [1 + l_i^\pm | \dots |]^{-1}, \dots; \quad (1.2)$$

$$W_{in,j} = |\tau_i \partial_t \ln(|A_n|, F_j)|, \quad H_{in,j} = |\lambda_i \partial_x \ln(|A_n|, F_j)|, \quad (1.3)$$

$u$  — скорость,  $e$ ,  $\dot{e}$  — энергия и мощность воздействия на структурно-кинетические элементы,  $j_n$  — поток величины  $a_n$ ,  $a_{nc}$  — пороговое значение  $a_n$  (резонанс, критическая точка).

Совместно со степенью неравновесности в качестве меры действия и меры изменения структуры следует использовать величины

$$G = gs_0, \quad S = s[g]/s_0, \quad s_0 = s[0]. \quad (2)$$

Величины  $gs$  по характеру воздействий подразделяются на активные, нейтральные и масштабные (1.3). Активные структурные неравновесности связаны с потоками массы, импульса, энергии; именно они фигурируют в законе границы качества [1].

3. Набор  $gs$  (1), описывая систему "воздействие–объект", обладает фундаментальными свойствами универсальности, полноты и конструктивности. Свойство полноты означает, что через величины  $gs$  выражаются все основные соотношения: уравнения состояния, определяющие соотношения, отклики.

Для малых значений  $gs$  эти свойства приводят к универсальному (для любых систем и типов воздействий) представлению основных соотношений в виде линейных зависимостей

$$\Phi(gs) \approx \Phi_0 + \sum K_{\phi n} gs_n, \quad K_{\phi n} = \frac{\partial \Phi}{\partial gs} / g = 0. \quad (3)$$

Величины  $K_{\phi n}$ , назовем их коэффициентами восприимчивости, являются структурно-обусловленными величинами; они реализуются как теплоемкости, кинетические коэффициенты, константы скорости и т. д. Зависимости (3) представляют собой, по сути, всю слабонеравновесную классическую теорию.

Используя набор  $gs$ , с учетом его фундаментальных свойств можно построить теорию подобия больших неравновесностей процессов, обобщающую динамическую теорию подобия Кутателадзе [3]. При этом набор степеней неравновесности задает универсальную шкалу неравновесности, которая позволяет сравнивать процессы в любых системах и "переносить" эффекты, обнаруженные в одной, на другие системы.

Вид  $gs$  показывает, что при постоянном факторе действия величина степеней неравновесности возрастает с увеличением структурного фактора. Это обстоятельство дает возможность определять потенциальную неравновесность систем посредством отношения соответствующих структурных факторов для разных систем. Такая шкала потенциальной неравновесности, по существу, была использована при классификации жидкостей [2] по сложности структуры: более сложной структуре соответствует большее значение структурных факторов.

Универсальность подобия обеспечивается условием "нормированности перехода", которое означает, что равенство активной структурной неравновесности единице соответствует структурному переходу. Например,  $V = 1$  соответствует переходу до–сверхзвук ( $v_T$  — местная скорость звука). По существу, на основе универсального подобия явление аномальной релаксации, обнаруженное для ксенона, было перенесено на все газы [4]. На этом же основании можно утверждать, что для

жидкостей и твердых тел в ударных волнах при  $E_1 = 1$  будет иметь место аномальная релаксация.

4. Укажем несколько классов неравновесности эффектов на основе особенностей поведения кинетических коэффициентов разного рода.

Согласно общим выражениям кинетических коэффициентов [5,2] получаем такие оценочные формулы для вязкости и проводимости:

$$\eta \sim \frac{m_e v_T}{\sigma_e (1 - \gamma) [1 + \frac{\pi}{\tau_2} + F]}, \quad \sigma \sim \frac{n_q q^2}{n m_e v_T \sigma_e [\dots]}, \quad (4)$$

$\tau_2 = 1/n_e v_T \sigma_e$ ,  $\gamma \simeq \pi \lambda_1^3 n_e$ ,  $n_{e,q}$  — численные плотности структурно-кинетических элементов и зарядов,  $\sigma_e(T, P, F) \sim \pi r_1^2$  — сечение взаимодействия структурно-кинетических элементов.

Как явствует из (4), особенности поведения кинетических коэффициентов обусловлены таковыми для структурных характеристик. Очевидными особенностями поведения являются существенно меньшие или большие (по сравнению со средней величиной для данного класса систем) значения, а также резкое изменение (скачок) характеристик.

4.1. Уменьшение (увеличение) сечения приводит к увеличению (уменьшению) времени релаксации  $\tau_2$  и длины свободного пробега, а с ними и соответствующих структурных неравновесностей; при этом очевидно увеличиваются (уменьшаются) кинетические коэффициенты. Об эффекте такого рода вследствие увеличения сечения за счет ионизации аргона свидетельствуют результаты [6].

Эффект минимума сечения в виде максимума тока можно наблюдать для слабоионизированной плазмы инертного газа при энергиях рамзауэровского рассеяния. В случае ударных волн имеются данные о резком увеличении времени релаксации (при предшествующем его уменьшении) с ростом скорости ударных волн [7]. По этому признаку соответствующий режим  $u \approx 9$  км/с в воздухе следует признать аномальным (он коррелирует с указанным в [8] режимом неустойчивости ударных волн).

4.2. Резкое изменение массы структурно-кинетических элементов обуславливает разнообразные неравновесные эффекты.

Быстрая диссоциация газа (например, посредством резонансного лазерного воздействия) приводит с учетом оценки  $\sigma_e \sim m_e^{2/3}$  к уменьшению вязкости согласно (4)  $\eta \sim m_e^{1/3}$ .

Эффект Ганна, как известно, обусловлен резким увеличением эффективной массы  $m_{ж}(E)$  при  $E > E_c$ . Это приводит к падению проводимости и возникновению бегущего "домена".

4.3. Эффекты "турбулизации" (образование макроскопических стохастизированных структурно-кинетических элементов), можно считать, обусловлены очень большим ростом  $m_e$  и очень сильным уменьшением  $v_T$ .

Оценка турбулентной вязкости  $\eta_T$  относительно молекулярной, согласно (4), дает ( $\lambda_{1T} \sim 0.1$  см)

$$\frac{\eta_T}{\eta} \sim \left(\frac{m_T}{m}\right)^{1/3} \frac{v_{TT}}{v_T} \sim (10^{19})^{1/3} \frac{u \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^4};$$

при скорости потока  $u = 10^3$  см/с имеем значение порядка  $10^3$ , что соответствует опыту.

При обычном, комплексном изменении структурных параметров характерным признаком возможного эффекта является существенное уменьшение кинетических коэффициентов при увеличении активного воздействия, приводящее к отрицательности дифференциального кинетического коэффициента:

$$K_d = \left(\frac{\partial K}{\partial g}\right) g + K < 0. \quad (5)$$

Эффекты отрицательности дифференциального коэффициента — возникновение неустойчивостей и неоднородностей, занимают основное место среди множества неравновесностей эффектов. Это обстоятельство непосредственно связано с законом аномальности [1].

## Список литературы

- [1] Сковорцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 17. С. 15–18.
- [2] Сковорцов Г.Е. // Вестник ЛГУ. 1979. В. 13. С. 94–98.
- [3] Кутателадзе С.С. // Анализ подобия и физические модели. М.: Наука, 1986. 293 с.
- [4] Мишин Г.И., Бедин А.П., Ющенко Н.И., Сковорцов Г.Е., Рязин А.П. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 11. С. 2315–2324.
- [5] Сковорцов Г.Е. // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. В. 3. С. 956–973.
- [6] Кулик П.П. // ТВТ. 1971. Т. 9. В. 2. С. 431–438.
- [7] Железняк М.Б., Мнацаканян А.Х. // ТВТ. 1968. Т. 6. В. 3. С. 390–398.
- [8] Барышников А.С., Сковорцов Г.Е. // ЖТФ. 1979. Т. 49. В. 11. С. 2483–2485.