

01

## **Чередование неравновесности и последовательности структурных переходов**

© Г.Е. Скворцов

С.-Петербургский государственный университет

Поступило в Редакцию 20 января 1997 г.

В работе рассматривается закон чередования неравновесности, предписывающий при большом диапазоне изменения воздействия колебательное изменение степени неравновесности. При возрастании воздействия интервалам убывания степени неравновесности в их начале соответствуют структурные переходы и сопутствующие аномальные состояния. Этот закон позволяет получить многообразие новых неравновесных эффектов.

Чередование неравновесности наряду со структурной обусловленностью, границей качества и аномальностью [1–3] составляют набор основных закономерностей, которые позволяют описать качественное поведение широкого круга систем, подвергаемых разного рода воздействиям. С этой закономерностью непосредственным образом связаны последовательности структурных переходов и, в частности, циклы преобразования и получения энергии, а также многообразие сопутствующих неравновесных эффектов.

1. Закономерность чередования неравновесности заключается в том, что при однородном возрастании воздействия на систему неравновесность, измеряемая степенью неравновесности, изменяется чередующимся образом: естественное возрастание сменяется убыванием, убывание — возрастанием и т. д., вплоть до разрушения системы.

При этом точкам (или интервалам) изменения характера поведения степени неравновесности соответствуют структурные переходы и, таким образом, с возрастанием воздействия имеет место последовательность структурных переходов, а между ними — режимы значительно меньшей неравновесности.

Для достаточно протяженных сильно неравновесных систем осуществляются пространственные и временные последовательности структурных переходов с интервалами малой неравновесности между ними.

Любая система представляет собой иерархию субсистем, а поскольку степень неравновесности для системы и ее субсистемы имеет разные значения, то закон чередования неравновесности можно рассматривать как неоднократный "обмен неравновесностью" между системой и ее субсистемами.

Продемонстрируем указанные три ипостаси чередования неравновесности на примере типичных последовательностей структурных переходов.

Наиболее многочисленную квазиравновесную последовательность структурных переходов, обусловленную однородным нагревом, составляют: переходы квантового типа при  $T < \theta_D$  [4], доменно-диффузионные переходы, плавление, жидкоструктурные переходы, испарение, диссоциация, плазмообразование. При более детальном рассмотрении переходов первого рода, например плавления и испарения, они обнаруживают трехстадийность, а также наличие неоднородной и нестационарной переходной структуры (флуктонов). Эти стадии — пред-, собственно- и постпереходную — можно считать переходами второго рода. В свою очередь, в структурных переходах второго рода выделяются угловыми точками три стадии [5], которые следует отнести к структурным переходам третьего рода.

В еще большей мере три ипостаси чередования неравновесности проявляются для последовательности структурных переходов неравновесного происхождения. Последовательность структурных переходов  $(I/\Delta T_+)$ , обусловленная увеличением разности температур на границах жидких сред: режимы Бенара, три кризиса кипения [6, с. 158]. Последовательность структурных переходов  $(F_+)$ : образование страт и доменов Ганна. Последовательность  $(g/V_+)$ : переход до-сверхзвук, режимы аномальной релаксации в газах [7,1,8]. В последнем случае особенно наглядны проявления чередования неравновесности для  $\text{CO}_2$ .

2. Степень неравновесности определяется набором величин [2]

$$GS: V = \left| \frac{u}{V_T} \right|, \quad E_i = \left| \frac{e}{E_i} \right|, \quad J_n = \left| \frac{j_n - j_{ne}}{j_{ns}} \right|, \dots, \quad F_i = \left| \frac{\tau_i f}{m v_T} \right|, \dots$$

$$W_{ni} = \tau_i |\partial_t \ln a_n|, \quad H_{ni} = \lambda_i |\partial_x \ln a_n|, \dots \quad (1)$$

Здесь используются обозначения [2].

Согласно закону чередования неравновесности величины  $GS$  уменьшаются в закритической окрестности структурных переходов, затем увеличиваются до режима структурного перехода и т. д.

Первая величина — локальное число Маха при  $v_t = v_s$  — скорость звука, указывает переход до-сверхзвук, изменяясь скачком:  $M > 1$  перед ударной волной,  $M < 1$  в возмущенном газе. Скачок и инверсный переход  $M < 1 \rightarrow M > 1$  демонстрирует соотношение для стационарного течения в плоском канале с изменяющейся в виде сопла шириной  $l(x)$ :

$$H_u \equiv \frac{l}{u} \frac{du}{dl} = \frac{1}{M^2 - 1}, \quad M = M(l). \quad (2)$$

Вторую, энергетическую, величину (1.2) можно рассмотреть для перехода газ-жидкость с использованием уравнения состояния ВдВ подобно тому, как это сделано в [9]. При этом имеет место уменьшение величины  $(pdv/E_{исп})$  в метастабильной области, а также оказывается возможным распространение волны разрежения [6].

Потоковую величину (1.3) можно рассмотреть на примере опытных данных о потоке тепла  $q(\Delta T)$  для кризисов кипения ([6], с.158).

В общем случае, аналогично приведенным примерам, зависимость определяющей величины  $J(g)$  от фактора действия  $g$  имеет типичный  $N$ -образный вид, где угловым точкам (реально скругленным) соответствуют структурные переходы, первому и второму подъемам — режимы со слабоменяющимися структурами  $S_1$  и  $S_2$ , а спуску соответствует аномальный режим с переходной, метастабильной, структурой. Последовательность структурных переходов общего вида схематически составляется из  $N$ -образных элементов посредством продолжения первого элемента.

Подходящей характеристикой свойств и состояния системы является набор восприимчивостей  $K_{nm} = \partial J_n / \partial g_m$ : постоянные положительные их значения соответствуют слабонеровновесным режимам, скачкам — структурные переходы, нулевые и отрицательные значения — метастабильным состояниям. В последнем случае, очевидно, система поглощает значительную часть "ресурса"  $g$  для перестройки своей структуры от  $s_1$  к  $s_2$ .

3. Достаточно общей схематической моделью реализации закона чередования неравновесности может служить "барьерно-резонансная" модель, которая основывается на следующих естественных положениях.

Рассматриваемая система имеет иерархическую динамическую структуру. Она представляется последовательностью наборов пяти величин:

$$\{\lambda_s, \tau_s, \varepsilon_s, m_s, n_s\}, \quad \lambda_s > \lambda_{s+1}, \quad \tau_s > \tau_{s+1}, \\ \varepsilon_s < \varepsilon_{s+1}, \quad m_s > m_{s+1}, \quad n_s < n_{s+1} (s = 0, 1, 2, \dots), \quad (3)$$

где соответственно обозначены характерные размер, время, энергия взаимодействия (связи), масса, численная плотность структурно-кинетических элементов  $s$ -уровня ( $s = 0$  относится ко всей системе).

Первоначальная использованная модель структуры [1,2] имела два уровня.

Иерархичность структуры проявляется при однородном возрастающем внешнем воздействии в последовательном преодолении энергетических барьеров — связей субструктур до уровня  $s$  в соответствии с критерием  $e = \varepsilon_1 + \dots + \varepsilon_s$ ,  $e$  — энергия воздействия на основной структурно-кинетический элемент. Барьерным образом осуществляются квазиравновесные фазовые переходы.

В случае временно-пространственной периодичности внешнего воздействия  $(\omega, k)$  при достижении равенств  $\omega\tau_s, k\lambda_s = 2\pi$  для достаточной величины амплитуды возникает, резонансным образом, соответствующий структурный переход. Примером может служить переход молекулярного газа вблизи тройной точки при облучении его излучением резонансной, с энергией первого электронного возбуждения, частоты в жидкость и при увеличении интенсивности облучения — переход жидкости в твердое состояние (с особыми свойствами).

4. Закон чередования неравновесности, сформулированный с условием возрастания воздействия, можно дополнить, включив условия убывания (с естественными уточнениями). Объединенная формулировка не означает, конечно, подобия последовательности структурных переходов (+) и (–). Более того, можно утверждать, что, как правило, ”прямые” структурные переходы (+) не совпадают с ”обратными” переходами (–) при ненулевых значениях скоростей их осуществления. Их различия и возможности управления соответствующими режимами позволяют получать циклы преобразования энергии значительно более эффективные, нежели квазиравновесные (Карно). Такого рода процессом является плазмоионный электролиз воды [10].

5. Укажем ряд применений закона чередования неравновесности и использования барьерно-резонансной модели структурных переходов.

5.1. Наличие интервалов малой неравновесности при большом воздействии позволяет использовать в них квазиклассическую теорию и тем самым существенно расширяется диапазон ее применимости. Это же обстоятельство инициирует создание эффективных технологий, использующих "окна квазиравновесности", как это сделано для лазера на красителе [11].

5.2. Общность барьерного механизма позволяет при подходящих условиях на основе последовательности структурных переходов для одного вещества и определенного воздействия предсказывать наличие и вид последовательности структурных переходов для других веществ и других воздействий. Например, удастся связать квазиквантовую последовательность структурных переходов ( $T_+$ ) [4] с последовательностью структурных переходов ( $\sigma_+$ ) скачкообразных деформаций [12]. На основе барьерного критерия [1,3] предсказываются режимы аномальной релаксации для множества одно-, двух- и трехатомных газов.

5.3. Резонансный механизм структурных переходов указывает возможности использования резонансно-импульсных технологий. В частности, на этой основе были получены режимы лазерной резки биополимеров без обугливания.

## Список литературы

- [1] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 17. С. 15–18.
- [2] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 6. С. 85–89.
- [3] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 7.
- [4] Системы особых температурных точек твердых тел. М.: Наука, 1986. 270 с.
- [5] Смирнов А.П. Там же. С. 210–239.
- [6] Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. Л.: Наука, 1986. 293 с.
- [7] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 12. С. 744–748.
- [8] Мишин Г.И., Бедин А.П., Юценкова Н.И., Скворцов Г.Е., Рязин А.П. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 11. С. 2315–2324.
- [9] Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. В. 4. С. 363–368.
- [10] Беклемишев Ю.А. // Тез. докл. междунар. конф. "Новые идеи в естествознании". СПб., 1996. С. 3.
- [11] Вестничева Г.А., Иванов А.Ю. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 1. С. 201–205.
- [12] Загоруйко Л.Н., Осецкий А.Н., Солдатов В.П. // Физ. мет. и металловед. 1977. Т. 43. В. 5. С. 1079–1087.