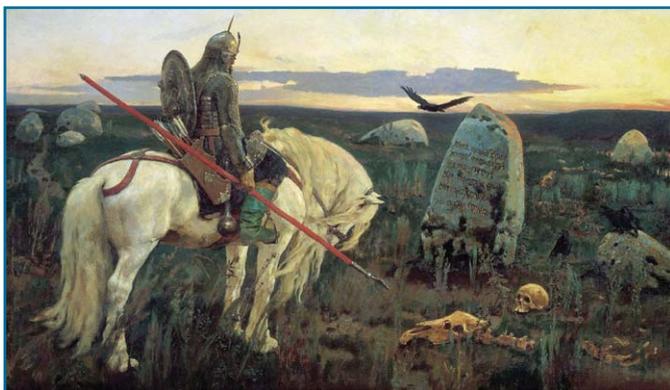


## ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ (*Dissipative structures*)

*«Передо мной лежат дороги,  
Куда пойду?  
Верное сердце, любовь как звезда, —  
Они мне помогут везде и всегда  
В бою обрести и как песню сложить  
Мою судьбу».*

*О. Генри «Дороги судьбы»*



В. Васнецов «Витязь на распутье»

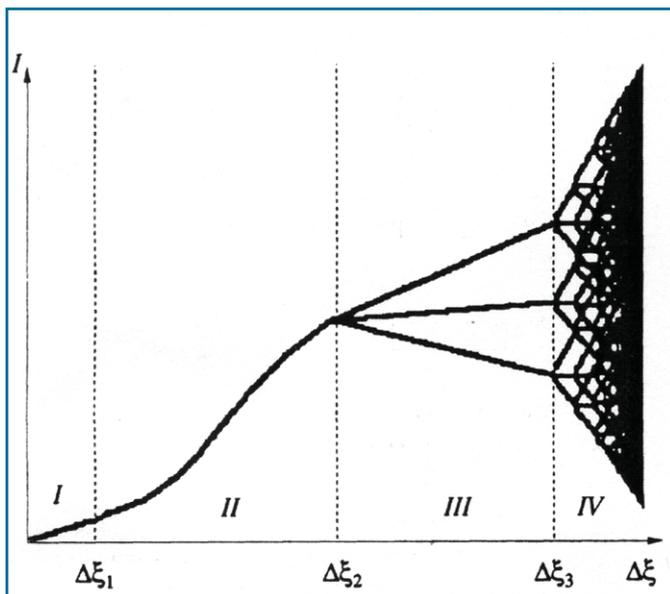
Помните богатыря из старинных русских былин, который то и дело встречает придорожный камень, гарантирующий ему разные неприятности, пойдет ли он направо, налево или продолжит путь прямо? Или главного героя рассказа О. Генри «Дороги судьбы», который решает изменить свою жизнь и уходит из родной деревни? «Три лье через туманную, залитую лунным светом равнину тянулась дорога, прямая, как борозда, проведенная плугом пахаря. В деревне считали, что дорога ведет, по крайней мере, в Париж; шагая по ней, молодой поэт не раз шептал про себя это слово. Никогда еще Давид не уходил так далеко от Вернуа. И так, три лье тянулась дорога и вдруг озадачила его. Поперек ее пролегла другая дорога, большая и торная. Давид постоял в раздумье и...». Далее автор описывает три варианта развития жизни Давида, в зависимости от того, какую дорогу он выбирает.

С точки зрения ученого, момент, когда Давид подошел к пересекающей его путь дороге, а бо-

гатырь – к камню на перепутье, можно назвать точкой бифуркации. Иначе говоря, в этот момент вместо одного устойчивого пути развития их судеб, как раньше, до разветвления дороги, появилось несколько.

Выбор альтернативного направления дальнейшей эволюции физико-химической системы осуществляется ею самой за счет случайных флуктуаций – всплесков параметров, «толчков», «встряски». Флуктуации могут усиливаться необратимыми диссипативными процессами и приводить к возникновению новых упорядоченных пространственно-временных структур, которые называют диссипативными, в отличие от равновесных структур, например кристаллов. Речь идет об устойчивом состоянии, возникающем в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне (или уходит) в открытую систему.

Рисунок 1 иллюстрирует возникновение «самоорганизации» в открытой системе. На нем представлена зависимость обобщенного потока  $I$  (массы, теплоты и т.п.) от источника процесса  $\Delta\zeta$  (например, энергии Гиббса  $\Delta G$ ). Равновесному состоянию системы соответствует  $\Delta\zeta = 0$ . При небольших отклонениях от равновесия (область I) зависимость  $I = f(\Delta\zeta)$  линейна, а поведение системы строго детерминировано и может быть описано с помощью соотношений Онзагера. В области II, где заметную роль начинают играть незатухающие флуктуации, зависимость  $I = f(\Delta\zeta)$  становится нелинейной, а в области III (там, где движущая сила процесса превышает некоторое



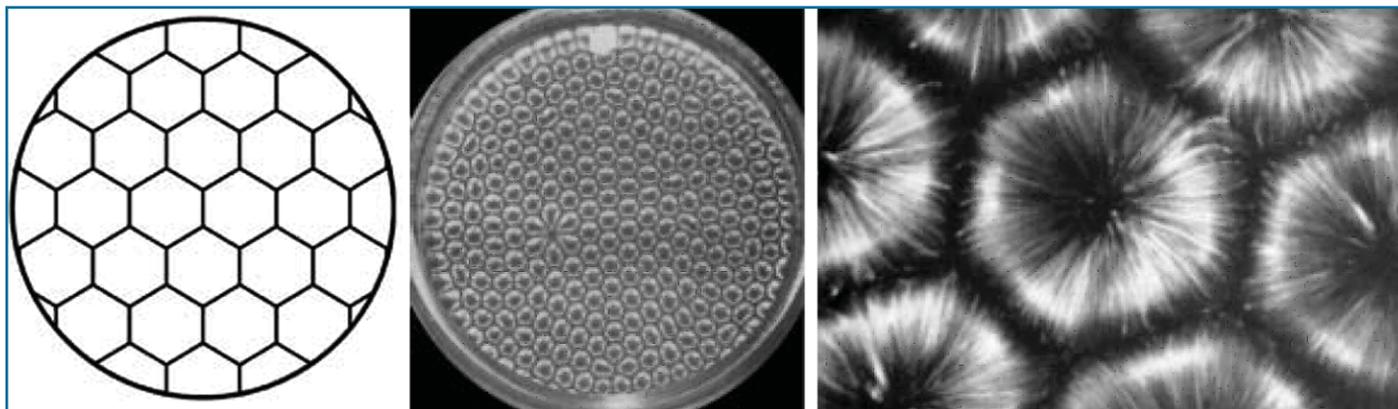
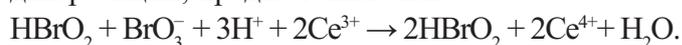
**Рис. 1.** I – область линейной зависимости, II – область нелинейной зависимости, III – область бифуркаций, IV – область детерминированного хаоса.

критическое значение  $\Delta\xi > \Delta\xi_2$ ) возникает бифуркация. В области IV наступает хаос.

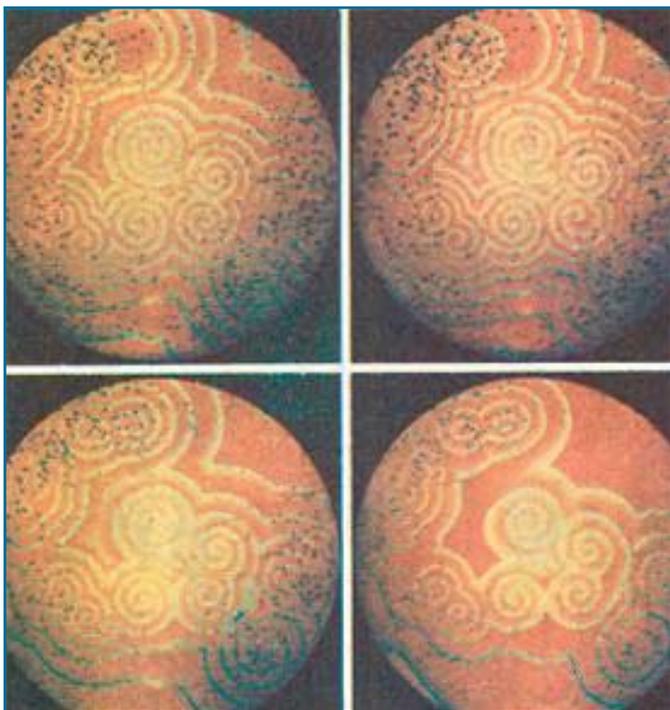
Классическим примером диссипативной структуры может служить структурирование жидкости под действием температурного градиента в виде ячеек Бенара. Они появляются, когда разность температур в плоскостях, ограничивающих слой жидкой фазы, превышает некоторое критическое значение, и беспорядочное движение молекул сменяется самосогласованным. Для демонстрации ячеек Бенара достаточно иметь сковороду, немного масла и какой-нибудь мелкий порошок (например, тальк или муку), чтобы было заметно движение жидкости (рис. 2). Если дно сковороды плоское и нагревается равномер-

но, то можно считать, что у дна и на поверхности поддерживаются постоянные температуры. Пока разность температур невелика, частички порошка неподвижны, а следовательно, неподвижна и жидкость. С ростом разности температур выше определенного предела возникают конвективные потоки (нагретая «донная» жидкость поднимается вверх, охлажденная на поверхности жидкость опускается вниз), которые закручивают взвесь частиц в лево- и правовращающиеся роликки (причем только единственная флуктуация в точке «закручивания» определяет ту ли иную последовательность вращений роликков!). Сверху становится видно, что вся среда разбивается на правильные шестигранные ячейки, целиком покрывающие поверхность – ячейки Бенара. Аналогична и природа узоров, возникающих на поверхности горячего кофе или чая.

Самый известный пример самоорганизации в гомогенных химических системах – это колебательные реакции, среди которых выделяют, прежде всего, реакцию Белоусова–Жаботинского: процесс окисления лимонной (или малоновой) кислоты бромитом калия в присутствии катализатора сульфата церия (III). Происходящие в системе процессы можно наблюдать визуально благодаря индикатору ферроину, придающему раствору голубую окраску при избытке  $\text{Ce}^{3+}$  и красную – при избытке  $\text{Ce}^{4+}$ . Ритмическая смена окраски с идеальным периодом и амплитудой позволяет рассматривать систему как химические часы. Важнейшим условием их функционирования является автокаталитический характер стадии реакции, предположительно:



**Рис. 2.** Ячейки Бенара, возникающие в подогреваемом слое жидкости



**Рис. 3.** Конфигурации, возникающие при реакции Белоусова–Жаботинского в тонком слое в чашке Петри

Автоколебательный характер этой реакции наиболее наглядно проявляется в возникновении пространственного упорядочения в этой системе (рис. 3).

Возникновение диссипативных структур является чрезвычайно важным для разработки новых процессов формирования наноструктурированных материалов. Это относится, например, к формированию колец Лизеганга в минералах, шестиугольных кольцеобразных структур из наночастиц золота на гладкой подложке, областей рассеяния света в жидких кристаллах при наличии градиента электрического поля, псевдокристаллов и других иерархически упорядоченных структур, сформированных из трехмерных блоков, уложенных в правильную структуру в потоке питающей жидкости – коллоидного раствора.

Во многих областях науки, прежде всего в химии, физике и биологии, важная роль необратимых процессов получила в настоящее время всеобщее признание. Это произошло во многом благодаря создателю термодинамики сильно неравновесных процессов, лауреату Нобелевской премии по химии бельгийскому ученому русского происхождения И.Р. Пригожину, работы которого во многом определили стиль современного научного мышления. Они позволили с единой точки зрения описать химические, биологические и социальные явления. «Поэт термодинамики» – так называют И.Р. Пригожина за красоту и элегантность его работ.

#### Литература:

1. Третьяков Ю.Д. Процессы самоорганизации в химии материалов // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 8. С. 731–763.