

Условия волнового протекания гомофазных реакций

Я.О. Шабловский

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Белоруссия, Гомель*

Исследовано протекание гомогенных и гетерогенных гомофазных реакций в волновом режиме. Определены условия возникновения свободных концентрационных колебаний в закрытой гомогенной реакционной системе. Дано количественное описание волнового протекания гетерогенных гомофазных реакций с образованием структур Лизеганга.

Ключевые слова: *гомогенная гомофазная реакция, гетерогенная гомофазная реакция, волновой режим, химические волны, структуры Лизеганга, гель.*

Гель, используемый в качестве реакционной среды, способен обусловить волновое протекание гомофазной химической реакции [1, р. 116–175]. Речь идёт о ритмической регулярности зон выделения осадка, называемых слоями Лизеганга. При теоретическом исследовании эффекта Лизеганга обычно анализируют дифференциальные уравнения, описывающие диффузию в априорно выбранной модельной системе [2]. Такой аналитический подход требует корректной детализации строения геля, служащего реакционной средой. Эта проблема имеет два аспекта.

С одной стороны, недавнее открытие [3] – гелеобразование в низкомолекулярных средах при парадоксально низких содержаниях дисперсной фазы – побуждает к пересмотру типовых формализаций, применяемых в математических моделях эффекта Лизеганга [1, 2]. В частности, необходим учёт бифуркативности выпадения в гелях осадка, образование которого, как известно [4], может обуславливаться не только произведением растворимости, но и потерей устойчивости геля.

С другой стороны, ещё столетие тому назад было высказана гипотеза [5]: для получения квазистационарных пространственных волн гомофазной реакции использование геля в качестве реакционной среды необязательно. Гипотеза [5] опиралась на результаты вполне убедительных опытов, но не привлекла внимания исследователей. Между тем, если данная гипотеза верна, то волны реакции – не специфическое свойство экзотических реакционных систем, а универсальное явление, и всякая принципиально осуществимая реакция может протекать в волновом режиме. Цель данной работы – определение условий перехода гомофазных реакций в волновой режим.

Теоретический анализ

Волны в химических системах традиционно изучают методами математического моделирования [6]. Этот подход привлекает возможностью использовать мощный математический аппарат, однако приходится констатировать [7, 8], что необходимые условия возникновения волн реакции до сих пор не выяснены.

Обычно, следуя [9], *a priori* полагают, что первичная предпосылка возникновения химических колебаний – протекание процесса вдали от равновесия, но мера такой удалённости остаётся неопределённой. Распространено убеждение [10, 11], что для возникновения химических колебаний необходимо наличие обратной связи. Последнее справедливо, когда речь идёт о гетерофазных реакциях. Если ход реакции предопределяется процессами на фазовой границе, то при её протекании неизбежно возникнет хемомеханическая, электрокинетическая и т. п. обратная связь. Вследствие этого осцилляции реакций на макроскопической фазовой границе представляют собой автоколебания. В общем случае наличие обратной связи для волнового протекания реакции не обязательно ввиду того, что химические колебания могут быть свободными. В первую очередь это относится к рассматриваемым здесь гомофазным реакциям.

Главенствующим фактором любого процесса является его энергетическая обеспеченность, поэтому мы применим эксергетический анализ. Будем исходить из того, что эксергия есть часть совокупной энергии системы, доступная для преобразования в другие виды энергии. Соответственно, химическая эксергия есть энергетическая обеспеченность протекания химической реакции в смеси с заданным соотношением компонентов в заданных термодинамических условиях. Стандартная методология эксергетического анализа, применяемая до сих пор [12], опирается на априорные реакции "энергетического обесценивания". Выбор таких реакций заведомо неоднозначен и потому уже более полувека является предметом непримиримых дискуссий. Чтобы обойти это затруднение, мы применим понятие химической эксергии не к компоненту реакционной смеси, а к процессу в данной смеси.

Примем следующие обозначения: T – температура, S – молярная энтропия, H – молярная энтальпия, G – молярная энергия Гиббса, Δ_r – изменение соответствующей величины, связанное с протеканием реакции. Общеизвестно, что если протекающая реакция ($\Delta_r G < 0$) является эндотермической ($\Delta_r H > 0$), то для осуществления этой реакции требуется подвести теплоту

$$\Delta Q = \Delta_r H + (-\Delta_r G) = T \Delta_r S.$$

Если же реакция – экзотермическая ($\Delta_r H < 0$), то теплота

$$\Delta Q = -\Delta_r H + \Delta_r G = -T \Delta_r S$$

при $\Delta_r S < 0$ отдаётся во внешнюю среду, а при $\Delta_r S > 0$ поглощается из внешней среды. Эти два фундаментальных равенства показывают, что энергетическую обеспеченность химической реакции можно количественно охарактеризовать величиной химической эксергии

$$\Xi = -T \Delta_r S.$$

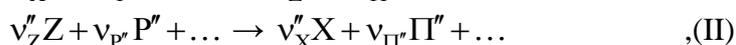
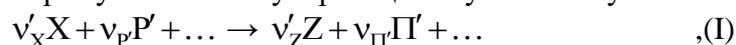
Данное определение удовлетворяет обоим основополагающим требованиям эксергетического анализа: во-первых, оно сочетает энергетический баланс реакционной смеси с балансом её энтропии, а во-вторых,

$$\Xi \Big|_{T \rightarrow 0} \rightarrow 0.$$

Отрицательная величина Ξ равна количеству теплоты, которое при протекании данной реакции система поглотит из окружающей среды; если же величина Ξ положительна, то она равна количеству теплоты, которое при протекании данной реакции система отдаст окружающей среде. Эндотермические реакции с положительной химической эксергией невозможны, следовательно, экзотермические реакции с отрицательной химической эксергией необратимы. Последнее имеет принципиальное значение для нашего дальнейшего исследования.

Свободные концентрационные колебания

Рассмотрим закрытую гомогенную реакционную систему



в которой возможно реверсирование $X \leftrightarrow Z$. Обозначим $\Delta_r G'$ и $\Delta_r G''$ изменения молярной энергии Гиббса при протекании полуциклов (I) и (II). Пусть \bar{a}'_X и \bar{a}'_Z – псевдоравновесные значения активностей a_X и a_Z реверсируемых компонентов X и Z, соответствующие остановке протекания полуцикла (I), т.е. состоянию

$$\Delta_r G' = 0 \quad (1)$$

\bar{a}''_X и \bar{a}''_Z – псевдоравновесные значения тех же активностей, соответствующие остановке протекания полуцикла (II), т.е. состоянию

$$\Delta_r G'' = 0. \quad (2)$$

Циклическое реверсирование $X \leftrightarrow Z$ в режиме свободных колебаний происходит при

$$\begin{cases} (\bar{a}'_X)^{v'_X} > (\bar{a}'_Z)^{v'_Z}, \\ (\bar{a}''_X)^{v''_X} < (\bar{a}''_Z)^{v''_Z} \end{cases} \quad (3)$$

и требует одновременного выполнения условий

$$\begin{cases} \Delta_r H' < 0, \Xi' < 0; \\ \Delta_r H'' < 0, \Xi'' < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta_r H'$ и $\Delta_r H''$ – тепловые эффекты реакций (I) и (II), Ξ' и Ξ'' – их химические эксергии.

Докажем условия (3), (4).

Будем исходить из того, что первичная предпосылка возникновения свободных колебаний – недостижимость невырожденного стационарного состояния – для гомогенной системы соответствует неустойчивости по отношению к диффузии (см. [9]). В силу этого обстоятельства при концентрационных колебаниях достижимы только безразличные либо неустойчивые равновесия. У закрытой гомогенной системы безразличное химическое равновесие неосуществимо, тогда как неустойчивых равновесий может быть несколько: если в этой системе возможно протекание нескольких реакций, то каждой из них в общем случае присуще своё парциальное химическое равновесие.

У системы (I), (II) два парциальных равновесия, определяемых равенствами (1) и (2). Для реакций (I) и (II) соответственно имеем:

$$\Delta_r G' = RT \left(\ln \frac{(a_Z)^{v'_Z} \cdot (a_{\Gamma'})^{v_{\Gamma'}} \cdot \dots}{(a_X)^{v'_X} \cdot (a_P)^{v_{P'}} \cdot \dots} - \ln \frac{(\bar{a}'_Z)^{v'_Z} \cdot (\bar{a}'_{\Gamma'})^{v_{\Gamma'}} \cdot \dots}{(\bar{a}'_X)^{v'_X} \cdot (\bar{a}'_P)^{v_{P'}} \cdot \dots} \right), \quad (5)$$

$$\Delta_r G'' = RT \left(\ln \frac{(a_X)^{v''_X} \cdot (a_{\Gamma''})^{v_{\Gamma''}} \cdot \dots}{(a_Z)^{v''_Z} \cdot (a_P)^{v_{P''}} \cdot \dots} - \ln \frac{(\bar{a}''_X)^{v''_X} \cdot (\bar{a}''_{\Gamma''})^{v_{\Gamma''}} \cdot \dots}{(\bar{a}''_Z)^{v''_Z} \cdot (\bar{a}''_P)^{v_{P''}} \cdot \dots} \right), \quad (6)$$

где a – активность соответствующего компонента, \bar{a} – её псевдоравновесное значение.

Концентрации остаются неотрицательными даже если их вариации биполярны, поэтому концентрационные колебания асимметричны: амплитуды прироста концентраций отличны от амплитуд их спада. Следовательно, при свободных колебаниях гомогенных реакций должно иметь место цикличное альтернирование преобладающего процесса. Цикличное альтернирование реакций (I) и (II) будет обеспечено, если оба равновесия (1) и (2) неустойчивы, а их положения на оси концентраций (активностей) не совпадают. Применяя эти требования к равенствам (5), (6), окончательно получаем: при свободных концентрационных колебаниях в системе (I), (II) выполняются условия (3).

Очевидно, что число собственных частот колебательной реакции в закрытой гомогенной системе равно числу пар реверсируемых компонентов этой системы. Система (I), (II) содержит одну пару реверсируемых компонентов X – Z, поэтому свободные колебания в данной системе являются одночастотными. Изменения концентраций

(активностей) всех компонентов замкнутой реакционной системы стехиометрически взаимосвязаны, причём такие взаимосвязи строго линейны. Вследствие этого в одночастотной системе (I), (II) возможны только антифазные изменения активностей a_x и a_z : минимуму величины a_x соответствует максимум величины a_z , и наоборот. Данное ограничение позволяет заключить: полуциклы свободных концентрационных колебаний в закрытой гомогенной системе суть необратимые реакции.

Количественно указанное требование выражают неравенства (4), обусловленные тем, что экзотермические реакции с отрицательной химической эксергией необратимы в силу невозможности эндотермической реакции с положительной химической эксергией. На качественном уровне выполнение этого требования можно оценивать, используя правило Бертолле-Михайленко.

В нетермостатированном реакторе из-за термохимических различий полуциклов ($\Xi' \neq \Xi''$, $\Delta_r H' \neq \Delta_r H''$) концентрационным колебаниям в реакционной смеси неизбежно будут сопутствовать симбатные либо антибатные температурные колебания. Благодаря этому при выполнении условий (4) в гомогенной реакционной системе можно посредством температурных колебаний индуцировать концентрационные колебания.

Если же реактор термостатирован, то следует учитывать, что при выполнении условий (4) реакция (I) протекает при

$$T > T' = \frac{\Delta_r H'}{\Delta_r S'}, \quad (7)$$

а реакция (II) – при

$$T > T'' = \frac{\Delta_r H''}{\Delta_r S''}, \quad (8)$$

где $\Delta_r S'$ и $\Delta_r S''$ – соответственно изменения молярной энтропии при протекании реакций (I) и (II). С учётом (7), (8) в термостатированном реакторе свободные концентрационные колебания возможны только при температурах, превышающих большее из двух пороговых значений T' и T'' .

Сделанные выводы подтверждаются имеющимися в литературе экспериментальными данными. Вырождение концентрационных колебаний при переохлаждении реакционной смеси наблюдалось в работе [13]. Прямую регистрацию температурных колебаний гомогенной реакции, сопутствующих её концентрационным колебаниям, произвели авторы [14]. В работе [15] был продемонстрирован обратный эффект – индуцирование колебательной гомогенной реакции температурными волнами.

Если компоненты реакционной системы чувствительны к определённому физическому воздействию, то такое воздействие изменит величины $\Delta_r G'$ и/или $\Delta_r G''$, в конечном итоге изменяя положения неустойчивых равновесий (1) и/или (2) на оси концентраций (активностей). Если при химических колебаниях $X \leftrightarrow Z$ происходит реверсирование "сильный магнетик \leftrightarrow слабый магнетик" (что имеет место, например, при реакции Белоусова-Жаботинского), то такие колебания можно модулировать магнитным полем. Экспериментальное подтверждение указанной возможности представлено в работе [16].

Пространственные волны реакции

Пусть реакционная система занимает объём V . Выделим внутри неё малый объём $\hat{V} \ll V$, задавая его расположение радиус-вектором \mathbf{r} . Состояние реакционной смеси будем оценивать по величине концентрации C некоторого контролируемого компонента этой смеси в фиксированном объёме \hat{V} . Если колебательная реакция не локализована на стационарной макроскопической фазовой границе, а протекает во всём объёме V , то при любом выборе $\hat{V}(\mathbf{r})$ зависимость $C(t)$ окажется непрерывной функцией времени t . Эти нелокальные колебания концентрации, в свою очередь, вызовут колебания массы $\hat{m} = \rho \hat{V}$ вещества в объёме \hat{V} , а точнее, колебания средней плотности ρ этого вещества:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \wp \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (9)$$

где $\wp = \partial \rho / \partial C$. Практический интерес представляют только периодические колебания. К таким колебаниям применима теорема Фурье, благодаря чему без ущерба для строгости можно записать

$$\frac{\partial C}{\partial t} \sim C(t).$$

С учётом этого из (9) следует: при колебательном протекании гомофазной реакции возникают пространственные волны, обусловленные колебаниями плотности, отстающими по фазе от колебаний концентрации. При распространении фронта реакции, протекающей с чередованием полциклов (I), (II), возникнет пространственное чередование областей с повышенной концентрацией компонента X и областей с повышенной концентрацией компонента Z .

При колебательном протекании гетерогенных гомофазных реакций наблюдается ритмическая регулярность зон выделения осадка, называемых слоями Лизеганга. Строго говоря, ритмически-слоистое осадкообразование (точнее, его внешнее проявление) известно с древнейших времён: речь идёт о характерном строении минералов осадочного происхождения. Тем не менее, до сих пор химический механизм ритмически-слоистого осадкообразования считается неясным

[17]. Учитывая это, мы проанализировали имеющиеся экспериментальные данные [18] в свете суперпозиционного принципа Кюри. Результаты проведённого анализа позволяют уверенно констатировать: анизотропия пространственной конфигурации слоёв Лизеганга однозначно определяется группой предельной симметрии, соответствующей спонтанному либо индуцированному нарушению изотропии в данной реакционной системе.

Благодаря указанной групповой подчинённости структур Лизеганга их количественный анализ можно свести к рассмотрению одномерной диффузии в изотропной реакционной среде. При этом рассмотрении мы будем опираться на два положения.

Во-первых, при формировании слоя Лизеганга диффузия ионов внешнего электролита в растворе внутреннего электролита происходит в отсутствие конвекции. Это позволяет использовать для описания пространственно-временного распределения концентрации \check{c} внешнего электролита в растворе внутреннего электролита стандартные приёмы математической теории диффузии [19]:

$$\check{c}(r;t) = \frac{\check{c}_0}{2\sqrt{\pi\mathcal{D}t}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\mathcal{D}t}\right), \quad (10)$$

где \check{c}_0 – "входная" концентрация внешнего электролита, \mathcal{D} – его коэффициент диффузии.

Во-вторых, ионы внешнего электролита при диффузионном переносе в растворе внутреннего электролита вступают с ним в реакцию и образуют седиментационно устойчивую взвесь, частицы которой в пределах формируемого ими слоя Лизеганга замещают в данном растворе внешний электролит. Следовательно, коэффициент диффузии внешнего электролита в растворе внутреннего электролита должен рассматриваться как комплексная величина:

$$\mathcal{D} = D - i\Gamma, \quad (11)$$

где D – вещественная часть, характеризующая приток внешнего электролита в зону реакции, Γ – мнимая часть, характеризующая необратимое замещение внешнего электролита в зоне реакции её продуктом, i – мнимая единица.

Равенства (10), (11) дают:

$$\check{c}(r;t) = \check{c}_0 \sqrt{\frac{\tilde{D}}{\pi t}} \exp\left(-\frac{\zeta r^2}{t}\right) \cos\left\{\frac{\varpi r^2}{t} - \frac{\tilde{\varphi}}{2}\right\}, \quad (12)$$

где

$$\tilde{D} = \frac{1}{4\sqrt{D^2 + \Gamma^2}}, \quad \tilde{\varphi} = \arctg \frac{\Gamma}{D}, \quad \zeta = \tilde{D} \cos \tilde{\varphi}, \quad \varpi = \tilde{D} \sin \tilde{\varphi}. \quad (13)$$

Слоям Лизеганга соответствуют значения $\check{c} < 0$, т.к. частицы взвеси продукта реакции замещают внешний электролит в растворе внутреннего

электролита, занимая при своём образовании в объёме этого раствора квазистационарное положение. С учётом данного неравенства из (12) получаем общее соотношение, определяющее пространственно-временную ритмичность слоёв Лизеганга:

$$\pi(4N-3) \leq \left| \frac{2\varpi r^2}{t} - \tilde{\varphi} \right| \leq \pi(4N-1), \quad (14)$$

где N – порядковый номер слоя.

Из (14) следует, что слой Лизеганга с порядковым номером N образуется на расстоянии

$$r_N = \sqrt{\frac{\tilde{\varphi} \pm \pi(4N-3)}{2\varpi} t} \quad (15)$$

и имеет толщину

$$\delta_N = \left| \sqrt{\tilde{\varphi} \pm \pi(4N-1)} - \sqrt{\tilde{\varphi} \pm \pi(4N-3)} \right| \cdot \sqrt{\frac{t}{2\varpi}}. \quad (16)$$

Равенства (15) и (16) показывают, что с ростом порядкового номера слоя Лизеганга расстояния между соседними слоями и их толщины изменяются симбатно. Верхний знак в равенствах (15) и (16) соответствует случаю

$$\frac{2\varpi r^2}{t} > \tilde{\varphi}, \quad (17)$$

обычно реализуемому на практике. А именно, при выполнении условия (17) расстояния между соседними слоями Лизеганга и их толщины с ростом порядкового номера увеличиваются. Нижний знак в равенствах (15) и (16) соответствует случаю

$$\frac{2\varpi r^2}{t} < \tilde{\varphi}. \quad (18)$$

При выполнении условия (18) толщины слоёв и расстояния между ними с ростом порядкового номера будут уменьшаться. С таким случаем экспериментаторы встречаются очень редко и считают его аномальным (см., например, [20]). В действительности варианты (17) и (18) альтернативны.

Пространственные волны гомофазной реакции обусловлены колебаниями плотности, отстающими по фазе от колебаний концентрации. Т.к. первичная предпосылка возникновения свободных колебаний – недостижимость невырожденного стационарного состояния, при прочих равных условиях перевести реакцию в волновой режим тем проще, чем больше в реакционной системе затруднено (в идеальном случае – практически невозможно) достижение стационарного состояния. В силу этой особенности гель, позволяющий обеспечить диффузионный перенос реагента при отсутствии конвекции, представляется оптимальной реакционной средой для воспроизводимого получения квазистационарных пространственных волн гомофазной

реакции. В первую очередь сказанное относится к гидрогелям: их нетривиальные и даже парадоксальные свойства (см., например, [21, 22]) могут быть использованы как для контроля волнового протекания реакции, так и для управления этим процессом.

Концентрационные волны гомогенной гомофазной реакции, протекающей в режиме свободных колебаний, возникают при выполнении условий (3), (4) и сопровождаются температурными волнами, пороговый характер которых определяется условиями (7), (8). Волновой режим гетерогенных гомофазных реакций определяется соотношениями (12) – (18).

Список литературы

1. Henisch H. K. Crystals in gels and Liesegang rings. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 212 p.
2. Полежаев А.А. Теория структур Лизеганга // Сб. трудов Международной конференции "МКО-2003". Под общей редакцией Г.Ю. Ризниченко. Ижевск: Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2003. Том 2. Стр. 307–319.
3. Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Комаров П.В. Супрамолекулярные гели. Тверь: ТвГУ, 2011. 270 с.
4. Мальшев М. Д., Пахомов П. М., Комаров П. В. Мезоскопическое моделирование структурных переходов в цистеин-серебряном растворе // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2021. № 2(44). С. 80–90.
5. McGuigan H., Brough G.A. Rhythmic banding of precipitates (Liesegang's rings) // Journal of Biological Chemistry. 1923. Vol. 58, № 2. P. 415–423.
6. Куркина Е. С. Автоколебания, структуры и волны в химических системах. Методы математического моделирования. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. 220 с.
7. Поваров В. Г. О некоторых издержках современного моделирования колебательных химических процессов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4: Химия. 2007. № 3. С. 75–87.
8. Кольцов Н. И. Автоколебания химических реакций в закрытой изотермической системе // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2023. Т. LXVII, № 2. С. 21–27.
9. Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. London, New York: John Wiley & Sons Ltd, 1971. 306 p.
10. Taylor, A. F. Mechanism and phenomenology of an oscillating chemical reaction // Progress in reaction kinetics and mechanism. 2002. Vol. 27, № 4. P. 247–325.
11. Vilcu R., Bala D. Chemical oscillations in homogeneous systems. 1. Essential thermodynamic and kinetic conditions for the occurrence of oscillations // Analele Universității din București: Chimie, Anul XII (Serie nouă). 2003. Vol. I-II. P. 303–308.
12. Michalakis Ch., Fouillou J., Lupton R. C. Calculating the chemical exergy of materials // Journal of Industrial Ecology. 2021. Vol. 25, № 2. P. 274–287.

13. Vukojević V. B., Pejić N. D., Stanisavljev D. R., Anić S. R., Kolar-Anić L. Z. Determination of Cl^- , Br^- , I^- , Mn^{2+} , malonic acid and quercetin by perturbation of a non-equilibrium stationary state in the Bray–Liebhafsky reaction // *The Analyst*. 1999. Vol. 124, № 2. P. 147–152.
14. Ito Y., Nogawa M., Yoshida R. Temperature control of the Belousov-Zhabotinsky reaction // *Langmuir*. 2003. Vol. 19, № 23. P. 9577–9579.
15. Novak J., Thompson B. W., Wilson M. C. T., Taylor A. F., Britton M. M. Low frequency temperature forcing of chemical oscillations // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011. Vol. 13, № 26. P. 12321–12327.
16. Ванярхо В. Г. Вторичная периодичность концентрационных автоколебаний в реакции Белоусова-Жаботинского // *Научный альманах*. 2015. Т. 9, № 7. С. 941–945.
17. Nabika H., Itatani M., Lagzi I. Pattern formation in precipitation reactions: The Liesegang phenomenon // *Langmuir*. 2020. Vol. 36, № 2. P. 481–497.
18. Beneke K. Liesegang named in literature (*Published 1826–2005*). Kiel: Christian-Albrechts Univ., 2006. 145 p.
19. Bird R. B. Theory of diffusion // *Advances in Chemical Engineering*. 1956. Volume 1. P. 155–239.
20. Flicker M., Ross J. Mechanism of chemical instability for periodic precipitation phenomena // *The Journal of Chemical Physics*. 1974. Vol. 60, № 9. P. 3458–3465.
21. Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Пахомов П.М. Гелеобразование в низкоконцентрированных водных растворах, содержащих L-цистеин и нитрат серебра // *Журн. структурн. химии*. 2014. Т. 55, № 1. С. 181–185.
22. Андрианова Я.В., Вишневецкий Д.В., Иванова А.И., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Процессы гелеобразования в водном растворе L-цистеин/ AgNO_3 под влиянием солей металлов различной валентности // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2023. Т. 72. № 9. С. 2171–2179.

Об авторах:

ШАБЛОВСКИЙ Ярослав Олегович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского сектора Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого (246029, Гомель, пр-т. Октября, 48), e-mail: ya.shablowsky@yandex.ru

Conditions for wave regime of homophase reactions

Ya.O. Shablovsky

Gomel State Technical University, Belarus, Gomel

Homogeneous and heterogeneous homophase reactions in their wave regimes are studied. Conditions for arising free concentrational oscillations in a closed homogeneous reaction system are determined. Quantitative description for the wave regime of a heterogeneous homophase reaction is given with special attention to forming Liesegang patterns.

Keywords: *homogeneous homophase reaction, heterogeneous homophase reaction, wave regime, chemical waves, Liesegang patterns, gel.*

Дата поступления в редакцию: 06.08.2024.

Дата принятия в печать: 27.08.2024.