

УДК 546.06

О. Д. ЛИННИКОВ

Институт химии твёрдого тела УрО РАН

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЭНЕРГИЯМИ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА КРИСТАЛЛОВ

Предпринята попытка учесть влияние процесса сольватации частиц растворённого вещества на зарождение и рост кристаллов при кристаллизации из растворов в классической термодинамической теории нуклеации. Получен ряд интересных соотношений между энергиями активации процессов зарождения и роста кристаллов. Проведено сопоставление с опубликованными литературными данными.

раствор, зародышеобразование, рост кристаллов, метастабильная фаза, энергия активации, сольватация, нуклеация

Согласно классической термодинамической теории скорость образования новой фазы в объёме метастабильной (материнской) фазы является флуктуационным процессом и прямо пропорциональна концентрации критических зародышей возникающей новой фазы [1–8]:

$$J = Z \cdot \omega \cdot n_c^* \quad (1)$$

$$n_c^* = n^* \exp\left(-\frac{A_c}{k_B T}\right) \quad (2)$$

$$A_c = \frac{4}{3} \pi R_c^2 \sigma, \quad (3)$$

где J – скорость объёмного зародышеобразования (в объёме пара, газа, расплава или раствора), $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$;

Z – неравновесный фактор Зельдовича;

ω – частота, с которой частицы кристаллизующегося вещества присоединяются к зародышам критического размера, превращая их в стабильно растущие центры кристаллизации, с^{-1} ;

n_c^* – концентрация критических зародышей новой фазы (зародышей, находящихся в равновесии с пересыщенной материнской фазой), м^{-3} ;

n^* – концентрация частиц кристаллизующегося вещества в пересыщенной материнской фазе, м^{-3} ;

k_B – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – абсолютная температура, К;

A_c – работа образования критического зародыша новой фазы, Дж;

R_c – радиус критического зародыша новой фазы, м;

σ – удельная поверхностная энергия (поверхностное натяжение), Дж/м².

Приведённые выше уравнения справедливы для кристаллизации из паровой и газовой фазы. Представляет интерес вопрос о том, как изменятся эти уравнения классической теории при их приложении к случаю кристаллизации из растворов, если в первом приближении учесть гидратацию (для неводных растворов – сольватацию) частиц кристаллизующегося вещества в растворе. При этом для более чёткого выявления отличий процессов кристаллизации в различных конденсированных средах вначале рассмотрим процесс зародышеобразования в молекулярных расплавах. Следует

отметить, что обычно уравнения классической теории нуклеации, описывающие зародышеобразование в паровой или газовой фазе, автоматически, почти без изменений, с небольшими оговорками, переносятся и на случай кристаллизации в конденсированных средах. Очевидно, это не совсем верно. Более того, в явном виде прямой учёт отличий процессов зародышеобразования в конденсированных средах от зародышеобразования в паровой или газовой фазе до последнего времени не производился. Ниже будет предпринята попытка заполнить этот пробел (в самом первом грубом приближении).

Так, при образовании новой фазы в молекулярных расплавах (при затвердевании такого расплава) в отличие от кристаллизации в паровой или газовой фазе необходимо, по-видимому, учитывать дополнительный энергетический барьер, связанный с преодолением частицами кристаллизующегося вещества связывающих их с расплавом межмолекулярных сил. Другими словами, следует учесть процесс диффузии частиц кристаллизующегося вещества в расплаве. Вследствие этого формула (2) должна быть преобразована к виду:

$$n_c^* = n^* \exp\left(-\frac{A_c}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right), \quad (4)$$

где E_D – энергия активации процесса диффузии частиц кристаллизующегося вещества в объёме конденсированной среды, Дж/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль).

Если образующийся зародыш новой фазы имеет форму сферы с радиусом R_c , то при кристаллизации в молекулярном расплаве множитель ω в уравнении (1) определяется выражением [2, 5]:

$$\omega = 4\pi R_c^2 K_n n^* a f_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right), \quad (5)$$

где K_n – коэффициент пропорциональности, включающий в себя стерический фактор (вероятность подходящей ориентации частиц кристаллизующегося вещества в момент столкновения с зародышем) и ряд других неучтённых факторов;
 a – длина диффузионного скачка частицы кристаллизующегося вещества, м;
 f_0 – частота тепловых колебаний частиц кристаллизующегося вещества, с⁻¹.

Радиус критического зародыша может быть найден по уравнению Гиббса-Томпсона [3–8]:

$$R_c = \frac{2\sigma \cdot \Omega}{k_B N_A T \ln\left(\frac{n^*}{n_0}\right)}, \quad (6)$$

где Ω – объём одного моля вещества зародыша, м³/моль;
 n_0^* – равновесная концентрация частиц кристаллизующегося вещества в материнской фазе при данной температуре, м⁻³;
 N_A – число Авогадро, моль⁻¹.

С учётом формул (1)–(6) для скорости зародышеобразования в молекулярных расплавах можно получить уравнение:

$$J = \frac{16Z\pi a f_0 K_n \sigma^2 \Omega^2 \cdot (n^*)^2}{(RT)^2 \ln^2\left(\frac{n^*}{n_0}\right)} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi N_A \sigma^3 \Omega^2}{3(RT)^3 \ln^2\left(\frac{n^*}{n_0}\right)}\right), \quad (7)$$

где $R = k_B N_A$; E_1 – энергия активации процесса зародышеобразования в объёме конденсированных сред, Дж/моль. Как видно, для молекулярных расплавов $E_1 = 2E_D$.

При переходе от молекулярных расплавов к водным (и неводным) растворам неорганических солей следует учесть, что в таких растворах растворённое вещество находится в виде гидратированных (сольватированных) молекул и ионов. Поэтому присоединение молекулы или иона кристаллизующегося вещества к критическому зародышу (да и само возникновение критического зародыша) будет, по-видимому, связано с преодолением ещё одного дополнительного потенциального барьера, обусловленного гидратацией (сольватацией) молекул или ионов растворённого вещества в растворе.

Как известно, процесс растворения твёрдых веществ в жидкостях и, в частности, неорганических солей, обусловлен взаимодействием молекул растворителя с молекулами и ионами растворяемого вещества. При этом происходит ослабление межмолекулярных и межионных связей в твёрдом веществе. В результате молекулы или ионы, из которых состоит растворяемое вещество, начинают переходить в раствор, и происходит растворение твёрдого вещества. При этом молекулы или ионы растворённого вещества в растворе гидратированы (сольватированы), т. е. окружены оболочкой из молекул растворителя. Поэтому для обратного перехода из жидкой фазы в твёрдую им необходимо сбросить эту оболочку. Последнее сопряжено с преодолением соответствующего потенциального барьера. Поэтому присоединение молекул или ионов растворённого вещества к критическому зародышу (да и само возникновение критического зародыша) будет возможно только после их частичной (или полной) дегидратации (десольватации). Таким образом, в уравнения (4) и (5) необходимо, по-видимому, ввести новые дополнительные экспоненциальные множители, учитывающие этот потенциальный барьер:

$$n_c^* = n^* \exp\left(-\frac{A_c}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_{ds}}{RT}\right), \quad (8)$$

$$\omega = 4\pi R_c^2 K_n n^* a f_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_{ds}}{RT}\right), \quad (9)$$

где E_{ds} – энергия дегидратации (десольватации) частиц растворённого вещества при переходе их из объёма жидкой фазы в твёрдую, Дж/моль.

Если учесть также, что $n^* = [C] \cdot 10^3 \cdot N_A$, где $[C]$ – молярная концентрация (моль/л) пересыщенного раствора кристаллизующегося вещества, то получим уравнение, описывающее скорость гомогенного зародышеобразования в растворах солей:

$$J = \frac{16 \cdot 10^6 Z \pi a f_0 K_n \sigma^2 \Omega^2 N_A^2 [C]^2}{(RT)^2 \ln^2\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi N_A \sigma^3 \Omega^2}{3(RT)^3 \ln^2\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}\right), \quad (10)$$

где $E_1 = 2(E_D + E_{ds})$.

Рассмотрим теперь процесс гетерогенного зародышеобразования на инородной и собственной подложках. Так, скорость поверхностного зародышеобразования на чужеродной подложке и концентрация критических зародышей, возникших на поверхности подложки в соответствии с принятыми допущениями, будут определяться выражениями:

$$J_s = Z \cdot \omega_s \cdot n_{cs}^*, \quad (11)$$

$$n_{cs}^* = n_s^* \exp\left(-\frac{A_c}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{DS}}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_{dsad}}{RT}\right), \quad (12)$$

где J_s – скорость поверхностного зародышеобразования на инородной подложке, $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;
 ω_s – частота, с которой частицы кристаллизующегося вещества присоединяются к зародышам критического размера на поверхности подложки, превращая их в стабильно растущие центры кристаллизации, с^{-1} ;
 n_{cs}^* – концентрация критических зародышей на поверхности подложки, м^{-2} ;
 n_s^* – концентрация частиц кристаллизующегося вещества, адсорбированных на поверхности подложки, м^{-2} ;
 E_{DS} – энергия активации процесса поверхностной диффузии частиц кристаллизующегося вещества вдоль поверхности подложки, Дж/моль;
 E_{dsad} – энергия дегидратации (десольватации) частиц кристаллизующегося вещества при их присоединении к критическому зародышу из адсорбированного слоя на поверхности подложки, Дж/моль.

Отметим, что формула (11), в соответствии с классической теорией нуклеации [3, 5], предполагает, что критические зародыши образуются из частиц кристаллизующегося вещества, адсорбированных на поверхности подложки.

Как и при зарождении в объёме, при гетерогенном зародышеобразовании возникшие зародыши критического размера становятся центрами кристаллизации и продолжают свой устойчивый дальнейший рост только после присоединения к себе ещё хотя бы одной частицы (молекулы или иона) кристаллизующегося вещества. Однако в отличие от гомогенного зародышеобразования, в данном случае, это присоединение может протекать двумя путями [5]: (1) за счёт прямого встраивания частиц кристаллизующегося вещества из объёма раствора и (2) за счёт встраивания частиц кристаллизующегося вещества, адсорбированных на поверхности подложки и их последующей поверхностной диффузии к возникшему зародышу новой фазы.

Если при зародышеобразовании на инородной подложке критический зародыш имеет форму шарового сегмента и его дальнейший рост протекает путём присоединения молекул (ионов) кристаллизующегося вещества прямо из объёма раствора, то в соответствии с [5] и принятыми допущениями уравнение (9) примет вид:

$$\omega_s = 2\pi R_c^2 (1 - \cos \theta) K_n n^* a f_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_{ds}}{RT}\right). \quad (13)$$

Если дальнейший рост критического зародыша происходит за счёт присоединения частиц кристаллизующегося вещества, адсорбированных на подложке, то аналогично получим

$$\omega_s = 2\pi R_c \sin \theta \cdot K_n n_s^* a f_0 \exp\left(-\frac{E_{DS}}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_{dsad}}{RT}\right). \quad (14)$$

В первом приближении можно также принять, что

$$n_s^* = K_{na} \cdot n^* \cdot \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_{dsa}}{RT}\right), \quad (15)$$

где K_{na} – коэффициент пропорциональности;
 E_{dsa} – энергия дегидратации (десольватации) частиц кристаллизующегося вещества при их адсорбции на поверхности подложки (при переходе из объёма жидкой фазы на поверхность подложки), Дж/моль. Очевидно, что $E_{ds} = E_{dsa} + E_{dsad}$.

Тогда после соответствующих подстановок можно получить уравнения, описывающие скорость гетерогенного зародышеобразования на чужеродной подложке в растворе:

$$J_s = \frac{8 \cdot 10^6 Z \pi a f_0 (1 - \cos \theta) K_n K_{na} \sigma^2 \Omega^2 N_A^2 [C]^2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi N_A \sigma_{ef}^3 \Omega^2}{3(RT)^3 \ln^2\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}\right)}{(RT)^2 \ln^2\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}, \quad (16)$$

$$J_s = \frac{4 \cdot 10^6 Z \pi a f_0 \sin \theta \cdot K_n K_{na}^2 \sigma \Omega N_A^2 [C]^2 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi N_A \sigma_{ef}^3 \Omega^2}{3(RT)^3 \ln^2\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}\right)}{RT \ln\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}, \quad (17)$$

где $E_2 = 2(E_D + E_{ds}) + E_{DS}$ – энергия активации процесса поверхностного зародышеобразования при росте критического зародыша путём присоединения молекул (ионов) кристаллизующегося вещества из объёма раствора, Дж/моль;
 $E_3 = 2(E_D + E_{DS} + E_{ds})$ – энергия активации процесса поверхностного зародышеобразования при росте критического зародыша за счёт присоединения молекул (ионов) кристаллизующегося вещества, адсорбированных на подложке, Дж/моль;
 σ_{ef} – эффективная удельная поверхностная энергия, Дж/м² [3–6].

Как видно, при справедливости сделанных предположений, $E_3 = E_2 + E_{DS}$. Отсюда следует, что, вследствие более низкой энергии активации, процесс гетерогенного зародышеобразования в растворах должен протекать преимущественно путём присоединения молекул (ионов) кристаллизующегося вещества из объёма раствора.

Гетерогенное зародышеобразование на собственной подложке, в отличие от зародышеобразования на чужеродной подложке, протекает путём образования не трёхмерных, а двухмерных зародышей [3–8]. В случае если образующийся критический зародыш имеет форму диска, его радиус (R_{cs}) и работа образования (A_{cs}) равны [3–8]:

$$R_{cs} = \frac{\sigma \cdot \Omega}{RT \ln\left(\frac{n^*}{n_0}\right)}, \quad (18)$$

$$A_{cs} = \frac{\pi \cdot \Omega \sigma^2 a_0}{RT \ln\left(\frac{n^*}{n_0}\right)}, \quad (19)$$

где a_0 – параметр кристаллической решётки кристаллизующегося вещества, м.

Как и ранее, можно предположить, что поверхностное зародышеобразование на собственной подложке может идти двумя путями: (1) за счёт встраивания частиц кристаллизующегося вещества из объёма раствора и (2) за счёт встраивания частиц кристаллизующегося вещества, адсорбированных на поверхности подложки. Соответствующие подстановки приводят к уравнениям, описывающим скорость зародышеобразования на собственной подложке:

$$J_s^* = \frac{2 \cdot 10^6 Z \pi a f_0 (1 - \cos \theta) K_n K_{na} \sigma^2 \Omega^2 N_A^2 [C]^2}{(RT)^2 \ln^2\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \exp\left(-\frac{a_0 \pi N_A \sigma^2 \Omega}{(RT)^2 \ln\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}\right), \quad (20)$$

$$J_s^* = \frac{2 \cdot 10^6 Z \pi a f_0 \sin \theta \cdot K_n K_{na}^2 \sigma \Omega N_A^2 [C]^2}{RT \ln\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)} \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right) \exp\left(-\frac{a_0 \pi N_A \sigma^2 \Omega}{(RT)^2 \ln\left(\frac{[C]}{[C_0]}\right)}\right). \quad (21)$$

Рассмотрим теперь процесс роста кристаллов (кинетический режим, когда диффузией можно пренебречь). В случае атомно-шероховатых граней и нормального механизма роста частицы кристаллизующегося вещества могут присоединяться к растущему кристаллу в любой точке его поверхности, и скорость роста описывается уравнением первого порядка относительно пересыщения раствора [5]:

$$V = k_1 \exp\left(-\frac{E_4}{RT}\right) ([C] - [C_0]), \quad (22)$$

где V – линейная скорость роста грани кристалла, м/с;
 k_1 – коэффициент пропорциональности;
 E_4 – энергия активации процесса роста кристаллов при нормальном механизме роста, Дж/моль.

Очевидно, что если кристаллы имеют атомно-шероховатые грани, то частицы кристаллизующегося вещества перед встраиванием в кристаллическую решётку растущего кристалла, также как и при образовании зародыша, должны сначала совершить диффузионный скачок из объёма раствора к излому на поверхности кристалла, а затем сбросить окружающую их оболочку из молекул растворителя. Тогда следует ожидать, что

$$E_4 = E_D + E_{ds}. \quad (23)$$

При дислокационном росте граней и низких пересыщениях раствора [5]:

$$V = k_2 \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) ([C] - [C_0])^2, \quad (24)$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности;
 E_5 – энергия активации процесса роста кристаллов при дислокационном механизме роста, Дж/моль.

При дислокационном механизме роста, аналогично процессу гетерогенного зародышеобразования, встраивание частиц кристаллизующегося вещества в решётку растущего кристалла может протекать двумя путями: (1) за счёт прямого присоединения частиц кристаллизующегося вещества из объёма раствора и (2) за счёт встраивания частиц кристаллизующегося вещества, адсорбированных

на поверхности кристалла и их последующей поверхностной диффузии к ступеням роста. В первом случае энергия активации процесса роста должна также описываться формулой (23) (т. е. $E_5 = E_4$), а во втором, при учёте процесса поверхностной диффузии, можно получить:

$$E_5 = E_D + E_{DS} + E_{dsad} + E_{dsa} = E_D + E_{DS} + E_{ds} = E_4 + E_{DS}. \quad (25)$$

Если принятые допущения верны, то можно записать следующие соотношения между энергиями активации процессов роста и зарождения кристаллов:

$$E_1 = 2E_D + 2E_{ds} = 2E_4, \quad (26)$$

$$E_2 = 2(E_D + E_{ds}) + E_{DS} = 2E_4 + E_{DS} \approx 2E_4. \quad (27)$$

Из полученных выражений следует, что энергия активации процесса гомогенного зародышеобразования в молекулярных расплавах [формула (7)] должна быть равна удвоенной энергии активации процесса диффузии частиц кристаллизующегося вещества в объёме расплава, а гетерогенное зародышеобразование и рост кристаллов в растворах преимущественно протекают за счёт присоединения частиц кристаллизующегося вещества прямо из объёма раствора, так как энергии активации этих процессов ниже энергий активации процессов присоединения частиц кристаллизующегося вещества из адсорбированного слоя на поверхности подложки или кристалла. Кроме того, процессы гетерогенного зародышеобразования на чужеродной и собственной подложках должны иметь почти одинаковую энергию активации.

Представляет интерес сравнить полученные закономерности с имеющимися в литературе экспериментальными данными. К сожалению, необходимые для этого сведения мы нашли только в нескольких работах [9–13].

В двух наших старых работах [9, 10] было показано, что скорость гетерогенного зародышеобразования сульфата кальция на чужеродной (нержавеющая сталь) и собственной подложках действительно лучше всего описываются уравнениями (16) и (20), а их энергии активации практически совпадают. Так, согласно [9, 10] энергия активации процесса зародышеобразования сульфата кальция на поверхности нержавеющей стали (чужеродная подложка) равна $100,9 \pm 15,6$ кДж/моль, а на собственной подложке – $139,4 \pm 40,8$ кДж/моль (уровень значимости 0,05). Видно, что в пределах ошибки эксперимента они совпадают. Далее, энергия активации процесса дислокационного роста (квадратичная зависимость скорости роста от пересыщения раствора) грани (120) кристаллов гипса составила $59,1 \pm 7,8$ кДж/моль (уровень значимости 0,05) [10], что также подтверждает полученное выше соотношение (27):

$$E_2 = 139,4 \pm 40,8 \text{ кДж/моль} \approx 2E_4 = 2 \times (59,1 \pm 7,8) \text{ кДж/моль} = 118,2 \pm 15,6 \text{ кДж/моль}.$$

В работе [11] методом термодинамического цикла были рассчитаны энергии гидратации хлоридов калия и натрия в водных растворах, которые равны $60,8$ – $61,5$ кДж/моль и $47,4$ – $47,8$ кДж/моль соответственно. Экспериментальные данные по энергиям активации процессов нормального роста кристаллов хлоридов калия и натрия при спонтанной кристаллизации этих солей из водных растворов получены в работах [12, 13], они оказались равны $61,8$ – $65,2$ кДж/моль [13] и $49,1 \pm 5,9$ кДж/моль [13]. Между тем, согласно формуле (23), энергия активации процесса роста кристаллов по нормальному механизму должна быть приблизительно равна энергии дегидратации соли [входящую в уравнение (23) величину энергии активации процесса диффузии можно не учитывать, так как она для водных растворов имеет значение всего в несколько кДж/моль]. Как видно из приведённых выше данных работ [11–13], наблюдается удивительно точное выполнение этого соотношения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фольмер, М. Кинетика образования новой фазы [Текст] / М. Фольмер. – М. : Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986. – 208 с.
2. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я. И. Френкель. – Л. : Наука, 1975. – 592 с.
3. Хирс, Д. Испарение и конденсация [Текст] / Д. Хирс, Г. Паунд. – М. : Металлургия, 1966. – 196 с.
4. Анисимов, М. П. Нуклеация: теория и эксперимент [Текст] / М. П. Анисимов // Успехи химии. – 2003. – Т. 72, В. 7. – С. 664–705.
5. Современная кристаллография [Текст]. Т. 3. Образование кристаллов / А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х. С. Багдасаров и др. – М. : Наука, 1980. – 403 с.
6. Сангвал, К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение [Текст] : пер. с англ. / К. Сангвал. – М. : Мир, 1990. – 492 с.

7. Mullin, J. W. Crystallization [Text] / J. W. Mullin. – 4th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. – 594 p.
8. Стрикленд-Констэбл, Р. Ф. Кинетика и механизм кристаллизации [Текст] : пер. с англ. / Р. Ф. Стрикленд-Констэбл. – Л. : Недра, 1971. – 310 с.
9. Linnikov, O. D. Investigation of the initial period of sulphate scale formation. Part 1. Kinetics and mechanism of calcium sulphate surface nucleation at its crystallization on a heat-exchange surface [Текст] / O. D. Linnikov // Desalination. – 1999. – V. 122. – P. 1–13.
10. Linnikov, O. D. Investigation of the initial period of sulphate scale formation. Part 2. Kinetics of calcium sulphate surface crystal growth at its crystallization on a heat-exchange surface [Текст] / O. D. Linnikov // Desalination. – 2000. – V. 128. – P. 35–46.
11. Горощенко, Я. Г. Расчёт энергий гидратации и диссоциации хлоридов лития, натрия и калия в водных растворах [Текст] / Я. Г. Горощенко, Р. В. Куприна // ЖФХ. – 1983. – Т. 57, № 1. – С. 54–57.
12. Linnikov, O. D. Spontaneous crystallization of potassium chloride from aqueous and aqueous-ethanol solutions. Part 1: Kinetics and mechanism of the crystallization process [Текст] / O. D. Linnikov // Crystal Research and Technology. – 2004. – V. 39, No. 6. – P. 516–528.
13. Linnikov, O. D. Spontaneous crystallization of sodium chloride from aqueous-ethanol solutions. Part 1. Kinetics and mechanism of the crystallization process [Текст] / O. D. Linnikov // Crystal Research and Technology. – 2006. – V. 41, No. 1. – P. 10–17.

Получено 15.05.2013

О. Д. ЛІННІКОВ
СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ЕНЕРГІЯМИ АКТИВАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
ЗАРОДЖЕННЯ І РОСТУ КРИСТАЛІВ
Інститут хімії твердого тіла УрВ РАН

У даній роботі зроблено намагання врахувати вплив процесу сольватації часток розчиненої речовини на зародження і ріст кристалів при кристалізації з розчинів у класичній термодинамічній теорії нуклеації. Отриманий ряд цікавих співвідношень між енергіями активації процесів зародження і росту кристалів. Проведене зіставлення з опублікованими літературними даними.
розчин, зародкоутворення, ріст кристалів, метастабільна фаза, енергія активації, сольватація, нуклеація

OLEG LINNIKOV
RATIO BETWEEN ENERGY OF ACTIVATION OF PROCESSES ORIGIN AND
GROWTH OF CRYSTALS
Institute of Chemistry Solid State of Russian Academy of Sciences

Attempt to consider influence of process of a salvation of particles of the dissolved substance on origin and growth of crystals at crystallization from solutions in the classical thermodynamic theory of a nucleation is made. A number of interesting ratios between energy of activation of processes of origin and growth of crystals has been obtained. Comparison to the published literary data have been carried out.
solution, nucleation, growth of crystals, metastable phase, energy of activation, salvation, nucleatio

Линников Олег Дмитриевич – доктор хімічних наук, професор Інституту хімії твердого тіла УрВ РАН. Наукові інтереси: аналіз фізико-хімічних основ кінетики процесів кристалізації речовин.

Линников Олег Дмитриевич – доктор химических наук, профессор Института химии твёрдого тела УрО РАН. Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ.

Linnikov Oleg – PhD in Chemistry, professor of Institute of Chemistry Solid State of Russian Academy of Sciences. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances.