

С. М. ЛОГВИНКОВ, О. Н. БОРИСЕНКО, Г. С. ПОПЕНКО, А. А. ИВАШУРА

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДИССИПАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ В КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Обговорюються аспекти зміцнення керамічних матеріалів за рахунок наноструктурування фазового складу безпосередньо під час випалювання при досягненні температури спряження твердофазних реакцій. Розглядаються перспективи нанодисперсного зміцнення міжфазних границь, при якому рівномірність розподілу дисперсної фази регулюється власне самоорганізуючим характером протікання твердофазних взаємодій.

Ключові слова: керамічні матеріали, дисипативна структура, спікання, самоорганізація, твердофазні реакції.

Обсуждаются аспекты упрочнения керамических материалов за счет наноструктурирования фазового состава непосредственно в обжиге при достижении температуры сопряжения твердофазных реакций. Рассматриваются перспективы нанодисперсного упрочнения межфазных границ, при котором равномерность распределения дисперсной фазы регулируется собственно самоорганизующимся характером протекания твердофазных взаимодействий.

Ключевые слова: керамические материалы, диссипативная структура, спекание, самоорганизация, твердофазные реакции.

As the main reasons for the formation of dissipative structures considered pairing solid-exchange reactions. In this case, the term "conjugate" refers to the state of the reaction system at a certain value of the external parameter (temperature), when at the same time ensures the thermodynamic condition of equality of the Gibbs free energy change of solid state reactions of exchange and kinetic condition of equality of the velocities of these reactions (steady state). At a temperature pairing of the material with equal probability is present all reactants and all products are solid-state interactions that are at the nanoscale level, and have a higher degree of combinatorial possibilities of the organization of the structural elements. Generated principles of dissipative structures in ceramic materials from the standpoint of heat resistance, the effect of nanostructuring directly to the heat treatment time, the thermal conductivity anisotropy, high temperature hardening. The characteristic experimental results of studies demonstrating the future prospects of the development of appropriate technologies and supporting the competitiveness of ceramic materials with dissipative structure.

Keywords: ceramic materials, dissipative structure, sintering, self-organization, solid-phase reactions.

Введение.

Отличительным признаком керамических материалов является то, что их получают при термообработке и спекание можно считать основной технологической стадией при изготовлении самого представительного класса керамических изделий – спеченных. Применение в исходной шихте чистых оксидов и удаление из полуфабрикатов паров воды, углекислого газа и других летучих соединений до температуры начала активного спекания, - позволяет рассматривать синтез керамического материала в приближении к закрытому типу термодинамической системы, т.е. способной обмениваться с окружающей средой энергией (тепловой, в частности), но не веществом. Дополнительное – квазиравновесное приближение позволяет применять для моделирования синтеза керамического материала термодинамически изолированные системы, т.е. не обменивающиеся с окружающей средой ни веществом, ни энергией. При этом весь процесс рассматривают как последовательную смену во времени состояний системы с фиксированными значениями температуры. Отмеченные приближения позволяют устранить проблему отсутствия в настоящее время количественных методов расчета для открытых термодинамических систем и с некоторой долей погрешности применять достаточно хорошо апробированные методы равновесной термодинамики изолированных систем [1–3]. Соответственно, специалисты керамического материаловедения получают дополнительные возможности познания специфики неравновесных процессов и их применения для создания материалов нового типа. Одна из таких возможностей обусловлена понятием

диссипативная структура, которое ввел в научную лексику Нобелевский лауреат Илья Пригожин для подчеркивания отличия от равновесных структур [4].

Цель работы.

Цель настоящей работы заключалась в указании расчетного метода прогнозирования реализации диссипативной структуры при реакционном спекании керамических материалов и обобщении практических следствий, характеризующих подобную структуру и позволяющих обеспечить в синтезируемом материале новый комплекс свойств.

Теоретические понятия и положения.

Равновесная термодинамика рассматривает процессы в изолированных системах и без учета времени [1–5]. По сути, весь математический аппарат описывает термостатику, в которой все физико-химические процессы в изолированной системе реализуются в направлении достижения равновесного состояния, отвечающего максимуму энтропии (S) или равенству нулю изменения свободной энергии Гиббса ($\Delta G = 0$). При этом критерием протекания химической реакции (в прямом направлении при формульной записи реакции «слева – направо») выступает неравенство $\Delta G < 0$, отвечающее условию возрастания энтропии в изолированной системе ($dS/dt > 0$) до максимального значения за время t . В неравновесной термодинамике особую роль играет баланс между производством энтропии внутри системы за счет концентрационных различий и потоком энтропии извне за счет обмена веществом и энергией. В условиях неравновесности могут возникать устойчивые состояния реакционной системы [4, 6–9]. Они имеют определенную структурную и функциональную упорядоченность, стационарность

состава. Критерием неустойчивости подобных упорядоченных стационарных состояний является значение производной избытка энтропии по времени ($\delta^2 S \leq 0$), отвечающей за способность системы рассеивать или диссипировать внешние возмущения. Для подчеркивания того, что такие состояния являются не статичными структурами, а динамически изменяющимися образованиями, обладающими способностью максимально быстро перестраивать фазовый состав и комбинации структурных элементов для рассеивания внешних тепловых потоков без нарушения целостности и функциональной способности материала, – их предложено называть диссипативными структурами [4].

Для технологии спеченных керамических материалов перспективность диссипативных структур определена, прежде всего, высшей степенью их адаптации к внешним энергетическим воздействиям. Такая адаптационная способность проявляется в прохождении реакционной системой серии стационарных состояний с участием различных комбинаций из компонентов материала. Каждое из стационарных состояний достигается как результат сопряжения двух или более химических реакций, различающихся механизмом взаимодействия. Сопряжения рассматривается [3] в виде взаимообъединения массообменных процессов через общие «элементарные» стадии химических реакций с установлением нового типа механизма взаимодействия, обладающего повышенным химическим потенциалом, равным сумме химических потенциалов сопрягающихся реакций. По мнению [4], основу такого процесса составляет синхронизация локальных колебаний концентраций в стационарных состояниях, для которых избыточное производство энтропии равно нулю, что определяет наличие «константы сопряжения» (D_i/l^2 , где D_i – коэффициенты диффузии компонентов реакционной системы; l – характеристический размер системы). По сути, в стационарном состоянии организуется когерентность поведения огромного количества наноразмерных частиц (группировок атомов, ионов) веществ реакционной системы, так как протекание каждой из сопрягающихся реакций термодинамически равновероятно и их скорости взаимосогласованы. Переход реакционной системы в стационарное состояние происходит скачкообразно и является «разумным» откликом на возрастающую внешнюю энергетическую нагрузку (внешним потоком вещества для спекающихся керамических материалов можно пренебречь). Обусловлено это тем, что возросший химический потенциал нового механизма взаимодействия отдаляет систему от равновесного состояния и при дальнейшем повышении интенсивности теплового потока определяет взаимодействие в направлении образования продуктов реакции, способных более эффективно диссипировать энергию, в частности, за счет образования соединений с более высокой температурой плавления. Количество компонентов реакционной системы и число индивидуальных химических соединений в ней, –

определяют разнообразие возможных взаимодействий и при дальнейшем повышении интенсивности тепловой нагрузки может наблюдаться последовательная серия сопряжений, отдаляющих момент окончательного плавления материала. Смена стационарных состояний в таком случае обеспечивает колебательный процесс, в котором периодически изменяются комбинации сосуществующих фаз и их концентрации. Подобные химические взаимодействия называют самоорганизующимися, осциллирующими, автокаталитическими, с эффективной обратной связью и т.п. [1, 4, 10–12]. В спекающихся керамических материалах колебания не могут быть незатухающими, так как массообменном с окружающей средой фактически можно пренебречь, а количество компонентов и химических соединений в составах материалов ограничено.

Пониманию сути самоорганизации физико-химических процессов [3, 4, 7, 10] предшествовали исследования экологических систем и математическое моделирование возможных взаимодействий в биоценозах [13–15]. Единство математических моделей, описывающих механизмы химических реакций и взаимодействий между биологическими группировками в биоценозах, было осознано позже, после становления химической термодинамики и кинетики [3–5, 10]. Математические модели в экологии оперируют фактически четырьмя типами взаимодействий между двумя группировками [15], которые можно наглядно ассоциировать с термодинамикой протекания двух реакций в химической системе (рис. 1):

1. «хищник – жертва», где одна группировка развивается за счет другой и угнетает ее развитие;
2. «конкуренция», где обе группировки развиваются за счет потребления одного ресурса;
3. «симбиоз», где обе группировки развиваются, стимулируя друг друга;
4. «комменсализм», где одна из группировок развивается не оказывая влияния на стабильное существование другой.

Показательно, что все возможные простые комбинации двух химических реакций полностью исчерпываются вариантами экологических взаимодействий 1 – 4 (рис. 1). Отображение зависимостей $\Delta G = f(T)$ для реакций на рис. 1 отрезками прямых вполне допустимо для твердофазных керамических процессов, т.к. подобные зависимости, как правило, имеют незначительную кривизну в технологически значимом интервале температур [3]. Из рис. 1 также следует, что только вариант 1 может обеспечить сопряжение процессов в единый механизм взаимодействия в каком-то критическом моменте времени или температуры.

Кинетика подобных процессов как в экологии, так и в физической химии описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, в которых имеется слагаемое, отвечающее за эффект «внутреннего отравления» или ингибирования и которые при

графических построениях отображаются S-образными кривыми с точкой перегиба [3–5, 15].

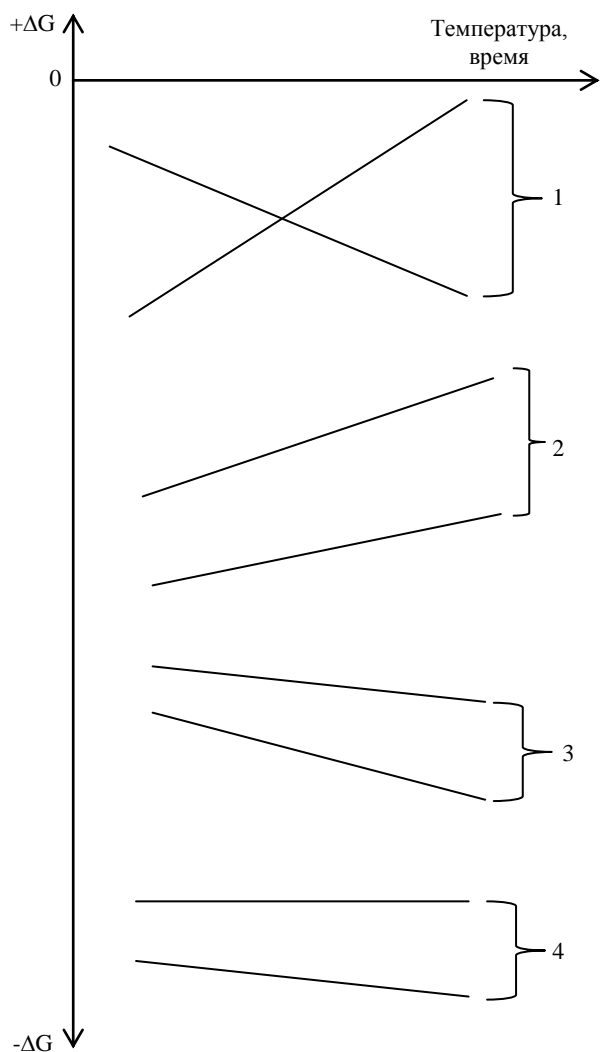


Рис. 1 – Термодинамические варианты протекания двух реакций в химической системе и их взаимосвязь с типами взаимодействий в экологических системах

Кинетика подобных процессов как в экологии, так и в физической химии описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, в которых имеется слагаемое, отвечающее за эффект «внутреннего отравления» или ингибирования и которые при графических построениях отображаются S-образными кривыми с точкой перегиба [3–5, 15]. Подобные кривые называются логистическими и их наличие в математических моделях полагают индикатором самоорганизующихся процессов [15]. В природе известно множество процессов, когда хищник и жертва в критические моменты не следуют типичному механизму поведения и объединяют свои усилия для противодействия внешним факторам, что обеспечивает им дальнейшую жизнеспособность. Термодинамическая интерпретация подобных процессов в приложении к химическим реакциям в спекающихся материалах представлена на рис. 2.

На рис. 2 показано, что сопряжение является скачкообразным процессом, объединяющим

механизмы реакций а, б и имеющим более высокую термодинамическую вероятность развития из-за суммирования значений ΔG обеих реакций, что удаляет реакцию систему в неравновесную область (указано стрелками), где возможно установление новых стационарных состояний. Именно сопряжение химических реакций лежит в основе, так называемого [4, 8–10], синергетического эффекта, а синергетика стала междисциплинарным научным направлением, изучающим самоорганизующиеся системы различной природы [8].

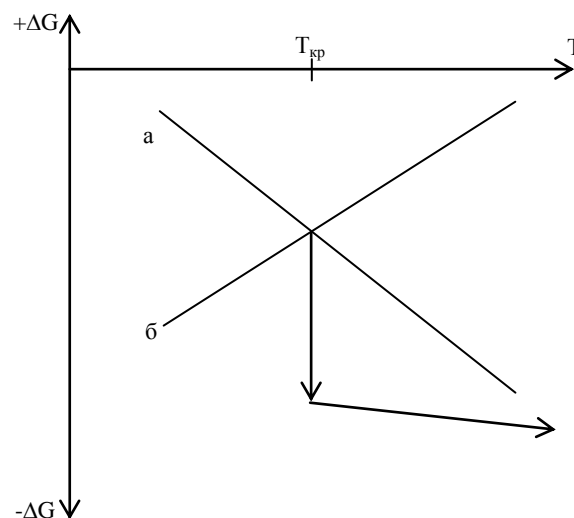


Рис. 2 – Сопряжение при $T_{кр}$ реакций а, б и объединение их механизмов, определяющих новый механизм взаимодействия, отдаляющий систему от наступления равновесия ($\Delta G = 0$)

Методика прогнозирования и перспективы диссипативных структур.

Наиболее приемлемым для технологической практики методом прогнозирования температур сопряжения твердофазных реакций является аналитическая запись всех комбинаций взаимодействия соединений в трех или четырех компонентных системах с последующим термодинамическим расчетом и построением графических зависимостей $\Delta G = f(T)$. При этом следует учитывать, что не всякая точка пересечения зависимостей $\Delta G = f(T)$ для отдельных реакций отвечает их сопряжению в новый механизм взаимодействия. Отличительные признаки мнимых стационарных сопряжений описаны [3]. На примерах материалов в системах $Al_2O_3 - SiO_2$, $ZrO_2 - Al_2O_3 - SiO_2$, $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$, $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$ и других [16–22] установлены отличительные характеры спеченной керамики с диссипативной структурой. В частности, спеченные при температурах сопряжения и резко охлажденные алюмосиликатные материалы имеют характерную микроструктуру, в основе которой наноразмерные сростки с определенной упорядоченностью. Подобную структуру называют графической или модулированной, она обеспечивает очень высокую прочность материалам как при

нормальных температурах эксплуатации, так и повышенную высокотемпературную прочность. При этом структура «замороженного» стационарного состояния наиболее адаптирована к температурным перепадам и материал обладает очень высокой термостойкостью. Оригинальный эффект реализуют спеченные керамические материалы, которые при нормальных температурах имеют неогнеупорный фазовый состав (в частности, корундомуллитокордиеритовый), но при нагреве до эксплуатационных температур меняют его на огнеупорный (корундомуллитошпинельный) за счет расхода еще до своего плавления неогнеупорного компонента (кордиерит) в ходе обменных твердофазных реакций с образованием более огнеупорного соединения (шпинель).

Достижение температур спекания, отвечающих сопряжению обменных твердофазных реакций и установлению стационарного состояния диссипативной структуры, позволяет обеспечить эффект эндотаксии зернистым керамическим материалам. Определенный режим нагрева сырья обеспечивает протекание твердофазных взаимодействий в поверхностном слое крупных зерен, кристаллическая структура которых является подложкой и определяет эпитаксиальную ориентировку всех кристаллических новообразований. Однако, полной когерентности срастаний не происходит и компенсация несогласованности в параметрах кристаллических решеток обеспечивается возникновением в реакционном слое упругих напряжений, способных оказывать дополнительное сопряжение внешним механическим нагрузкам. На принципах реализации диссипативных структур в спеченных керамических материалах появляется ряд новых технологических возможностей армирования микроstructures дендритовидными кристаллическими сростками, которые могут быть организованы как результат неполноты твердофазного обменного взаимодействия и наличия в конечной структуре реликтов исходной структурной упорядоченности. Совершенно новые возможности представляют материаловедам при объемнодеформационном упрочнении за счет различий в объемах кристаллических решеток реагентов и продуктов твердофазных обменных реакций. При этом важную роль могут иметь твердые растворы, через механизм образования, насыщения и распада которых протекают многие твердофазные обменные реакции с участием оксидов, что позволяет реализовать особенности их механизмов, например, демпфировать термомеханические нагрузки [3, 21].

Выводы. В заключении отметим, что выявление возможностей протекания твердофазных обменных реакций между компонентами спеченных керамических материалов представляет технологам чрезвычайно эффективные и сравнительно недавно используемые на практике новые методы управления взаимосвязью «состав – структура – свойства» на принципе сопряжения процессов.

Список литературы: 1. Крaснoв К. С. Физическая химия / К. С. Крaснoв, Н. К. Воробьев, И. Н. Годнев [и др.]. – В 2-х кн. – Кн. 1. Стрoение вешества. Термoдинамикa. – М.: Высшaя шкoлa, 1995. – 512 с. – Кн. 2. Электрoхимия. Химическая кинетика и катaлиз. – М.: Высшaя шкoлa, 1995. – 319 с. 2. Лютис К. Химическая термoдинамикa мaтериaлoв / К. Лютис. – М.: Метaллургия, 1989. – 503 с. 3. Лoгвинкoв С. М. Твepдoфaзные реакции oбмeнa в тeхнoлoгии кeрaмики : мoнoгрaфия / С. М. Лoгвинкoв. – X. : Изд. ХНЭУ, 2013. – 248 с. 4. Никoлис Г. Сaмooргaнизaция в нeрaвнoвесных систeмaх. Oт диссипaтивных структур к упoрядoченнoсти чeрeз флуктуaцию / Г. Никoлис, И. Пригoжин. – М.: Мир, 1979. – 512 с. 5. Кнoтькo А. В. Химия твepдoгo тeлa / А. В. Кнoтькo, И. А. Прeснякoв, Ю. Д. Трeтьякoв. – М.: ИЦ «Акaдeмия», 2006. – 304 с. 6. Ивaхнeнкo А. Г. Сaмooргaнизaция прoгнoзирующих мoдeлeй / А. Г. Ивaхнeнкo, И. А. Мюллeр. – К.: Тeхникa, 1985. – 223 с. 7. Свирeжeв Ю. М. Нeлинейные волны, диссипaтивные структуры и кaтaстрoфы в эколoгии / Ю. М. Свирeжeв. – М.: Нaукa, 1987. – 366 с. 8. Хaкeн Г. Синeргeтикa. Иeрaрхия нeустoйчивoсти в сaмooргaнизующихся систeмaх и устрoйствaх / Г. Хaкeн. – М.: Мир, 1985. – 423 с. 9. Эйгeн М. Гипeрцикл. Пpинципы сaмooргaнизaции мaкpoмoлeкул / М. Эйгeн, П. Шустeр. – М.: Мир, 1982. – 279 с. 10. Кoлeбaния и бeгущиe волны в химическeх систeмaх / пeр. с aнгл. пoд рeд. Р. Филдa, Р. Бургeрa, А. М. Жaбoтинскoгo. – М.: Мир, 1988. – 720 с. 11. Кeрнeр Б. С. Пульсирoвaннe «гeтeрoфaзные» oблaсти в нeрaвнoвесных систeмaх / Б. С. Кeрнeр, В. В. Oсипoв // Журнaл эспeримeнтaльнoй и тeорeтичeскoй физики. – 1982. – Т. 83, № 6. – С. 2201–2214. 12. Гoрбaнь А. Н. Oбхoд рaвнoвeсия (уpaвнeния химическoй кинeтики и их тeрмoдинамическoй aнaлизa) / А. Н. Гoрбaнь. – Нoвoсибирск : Нaукa, 1984. – 226 с. 13. Лoткa А. J. Elements of mathematical biology / A. J. Lotka // Dover Publications Inc. – 1956. – P. 88–94. 14. Вoльтeррa В. Мaтeмaтичeскaя тeория бoрьбы зa сущeствoвaниe / В. Вoльтeррa. – М.: Нaукa, 1976. – 285 с. 15. Лaвpик В. I. Мeтoды мaтeмaтичeскoгo мoдeлeвaния в эколoгии / В. I. Лaвpик. – К.: Видaвничий дiм «КМ Aкaдeмия», 2002. – 203 с. 16. Шaбaнoвa Г. Н. Aнaлиз фaзoвых измeнeний в мaтериaлax высoкoбaриeвoй oблaсти систeмы ВаО – Al₂O₃ – SiO₂ / Г. Н. Шaбaнoвa, С. М. Лoгвинкoв, Н. С. Цaнкo [и др.] // Збiрник нaукoвих пpacь ВAТ «УкpНДiВoгнeтpив iм. A. С. Бeрeжнoгo». – X. : Кaрaвeллa, 2009. – № 109. – С. 132–138. 17. Лoгвинкoв С. М. Влaниe низкoтeмпeрaтурнoгo твepдoфaзoгo вzаимoдeйствиa нa фaзoвый сoстaв и микрoструктуру мaтериaлoв систeмы ZrO₂ – Al₂O₃ – SiO₂ / С. М. Лoгвинкoв, В. Н. Шумeйкo, Н. К. Вepнигoрa [и др.] // Oгнeупopы и тeхничeскaя кeрaмикa. – 2006. – № 12. – С. 4–10. 18. Лoгвинкoв С. М. O мeхaнизмax oбpaтнoмy твepдoфaзoмy химическeх рeакций в систeмe MgO – Al₂O₃ – SiO₂ / С. М. Лoгвинкoв, Г. Д. Сeмчeнкo, Д. А. Кoбызeвa // Oгнeупopы и тeхничeскaя кeрaмикa. – 1998. – № 8. – С. 29–34. 19. Лoгвинкoв С. М. Oсoбeннoсти твepдoфaзoвzх вzаимoдeйстви и субсoлидуснoгo стрoения систeмы Al₂O₃ – SiO₂ / С. М. Лoгвинкoв // Oгнeупopы и тeхничeскaя кeрaмикa. – 2005. – № 6. – С. 7–15. 20. Лoгвинкoв С. М. Эффeкты oт твepдoфaзoвzх oбмeнных рeакций пpи пoлучeнии гeтeрoфaзoвzх тyгoплaвкzх oксиднzх мaтериaлoв / С. М. Лoгвинкoв // Збiрник нaукoвих пpacь ВAТ «УкpНДiВoгнeтpив iм. A. С. Бeрeжнoгo». – X. : Кaрaвeллa, 2009. – № 109. – С. 103–116. 21. Лoгвинкoв С. М. Пeрспeктивz тeхнoлoгiчнoгo викopистaння cпiнoдaльнoгo фaзoвoгo poзпaду сaпфiрoвzх i кoрдiсeритoвzх твepдzх poзчинiв / С. М. Лoгвинкoв, Г. Д. Сeмчeнкo, Д. А. Кoбызeвa [тa in.] // Фiзикa i хiмiя твepдoгo тiлa. – 2002. – Т. 3, № 2, С. 341–345. 22. Лoгвинкoв С. М. Мeтoдикa рaсчeтa рaвнoвeснoгo кoличeствa фaз пpи синтeзe мaтериaлoв систeмы MgO – Al₂O₃ – SiO₂ / С. М. Лoгвинкoв, В. Г. Кoбзин, Г. Н. Шaбaнoвa [и др.] // Bicник НТУ «ХП». – 2015. – № 50. – С. 27–54.

References: 1. Krasnov K. S., Vorob'ev N. K., Godnev I. N. *Fizicheskaja himija* [Physical chemistry]. V 2-h kn. Kn. 1. *Stroenie veshhestva. Termodinamika* [Structure of matter. Thermodynamics]. Moscow, Vysshaja shkola, 1995, 512 p. Kn. 2. *Jelektrohimija. Himicheskaja kinetika i kataliz* [Electrochemistry. Chemical kinetics and catalysis]. Moscow, Vysshaja shkola, 1995, 319 p. 2. Ljupis K. *Himicheskaja termodinamika materialov* [Chemical thermodynamics of materials]. Moscow, Metallurgija, 1989, – 503 p. 3. Logvinkov S. M. *Tverdofaznye reakcii obmena v tehnologii keramiki : monografija* [Solid-phase exchange reaction in ceramic technology : monograph]. Kharkov, Izd. HNJeU, 2013, 248 p. 4. Nikolis G., Prigozhin I. *Samoorganizacija v*

neravnovesnyh sistemah. Ot dissipativnyh struktur k uporjadochennosti cherez fluktuaciju [Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures for ordering through fluctuation]. Moscow, Mir, 1979, 512 p. **5.** Knot'ko A. V., Presnjakov I. A., Tret'jakov Ju. D. *Himija tverdogo tela* [Solid State Chemistry]. Moscow, IC «Akademija», 2006, 304 p. **6.** Ivahnenko A. G., Mjuller I. A. *Samoorganizacija prognozirujushhih modelej* [Self-organization of predictive models]. Kiev, Tehnika, 1985, 223 p. **7.** Svirezhev Ju. M. *Nelinejnye volny, dissipativnye struktury i katastrofy v jekologii* [Nonlinear waves, dissipative structures and catastrophes in ecology]. Moscow, Nauka, 1987, 366 p. **8.** Haken G. *Sinergetika. Ierarhija neustojchivosti v samoorganizujushhishja sistemah i ustrojstvah* [Synergetics. Hierarchy of instability in self-organizing systems and devices]. Moscow, Mir, 1985, 423 p. **9.** Jejgen M., Shuster P. *Gipercykl. Principy samoorganizacii makromolekul* [Hypercycle. The principles of self-organization of macromolecules]. Moscow, Mir, 1982, 279 p. **10.** Filda R., Burgera R., Zhabotinskogo A. M. *Kolebanija i begushhie volny v himicheskijh sistemah* [Vibrations and traveling waves in chemical systems]. Moscow, Mir, 1988, 720 p. **11.** Kerner B. S., Osipov V. V. Pul'sirujushhie «geterofaznye» oblasti v neravnovesnyh sistemah [Pulsating «heterophasic» field in nonequilibrium systems]. *Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoj fiziki*, 1982, vol. 83, no. 6, pp. 2201–2214. **12.** Gorban' A. N. Obhod ravnesija (uravnenija himicheskij kinetiki i ih termodinamicheskij analiz) [Balance bypass (chemical kinetics equations and thermodynamic analysis)]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 226 p. **13.** Lotka A. J. *Elements of mathematical biology*, Dover Publications Inc., 1956, pp. 88–94. **14.** Vol'terra V. *Matematicheskaja teorija bor'by za sushhestvovanie* [The mathematical theory of the struggle for existence]. Moscow, Nauka, 1976, 285 p. **15.** Lavryk V. I. *Metody matematychnogo modelyuvannya v ekolohiji* [Methods of mathematical modeling in ecology]. Kiev, Vydavnychyy dim «KM Akademiya», 2002, 203 p. **16.** Shabanova G. N., Logvinkov S. M., Capko N. S., Proskurnja E. M., Antonenko S. A., Mokrickaja V. K. Analiz fazovyh izmenenij v materialah vysokobarievoj oblasti sistemy BaO – Al₂O₃ – SiO₂ [Analysis of phase change materials

in the field high barium system BaO – Al₂O₃ – SiO₂]. *Zbirnyk naukovykh prats' VAT «UkrNDIVohnetryviv im. A. S. Berezhnoho»*. Kharkov, Karavella, 2009, no. 109, pp. 132–138. **17.** Logvinkov S. M., Shumejko V. N., Vernigora N. K., Zelencov S. Z., Tishhenko S. V. Vlijanie nizkotemperaturnogo tverdogofaznogo vzaimodejstvija na fazovij sostav i mikrostrukturu materialov sistemy ZrO₂ – Al₂O₃ – SiO₂ [Effect of low-temperature solid-phase interaction on the phase composition and microstructure of the material system ZrO₂ – Al₂O₃ – SiO₂]. *Ogneupory i tehničeskaja keramika*, 2006, no 12, pp. 4–10. **18.** Logvinkov S. M., Semchenko G. D., Kobzyeva D. A. O mehanizmah obratimyh tverdogofaznyh himicheskijh reakcij v sisteme MgO – Al₂O₃ – SiO₂ [About mechanisms of reversible solid-phase chemical reactions in the MgO – Al₂O₃ – SiO₂]. *Ogneupory i tehničeskaja keramika*, 1998, no 8, pp. 29–34. **19.** Logvinkov S. M. Osobennosti tverdogofaznyh vzaimodejstvij i subsolidusnogo stroenija sistemy Al₂O₃ – SiO₂ [Features solid-phase interactions and subsolidus structure system Al₂O₃ – SiO₂]. *Ogneupory i tehničeskaja keramika*, 2005, no 6, pp. 7–15. **20.** Logvinkov S. M. Jeffecty ot tverdogofaznyh obmennyh reakcij pri poluchenii geterofaznyh tugoplavkijh oksidnyh materialov [The effects of the solid-exchange reactions in the preparation of hetero-oxide refractory materials]. *Zbirnyk naukovykh prats' VAT «UkrNDIVohnetryviv im. A. S. Berezhnoho»*. Kharkov, Karavella, 2009, no. 109, pp. 103–116. **21.** Logvinkov S. M., Semchenko H. D., Kobzyeva D. A., Hurenko L. P. Perspektivy tekhnologichnogo vykorystannya spinodal'noho fazovoho rozpadu sappirynovykh i kordiyerytovykh tverdykh rozchyniv [Prospects for technological use spinodal decay phase sapphirine and cordierite solid solutions]. *Fizyka i khimiya tverdogo tila*, 2002, vol. 3, no 2, pp. 341–345. **22.** Logvinkov S. M., Kobzin V. G., Shabanova G. N., Korogodskaja A. N., Hristich E. V. Metodika rasčeta ravnesnogo kolichestva faz pri sinteze materialov sistemy MgO – Al₂O₃ – SiO₂ [Method for calculating quantity ravnesnogo phase materials in the synthesis of systems MgO – Al₂O₃ – SiO₂] // *Visnyk NTU "KhPI"*. 2015, no 50, pp. 27–54.

Поступила (received) 30.06.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Логвінков Сергій Михайлович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, завідувач кафедри технології, екології та безпеки життєдіяльності; тел.: (057) 758-77-08; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Логвинков Сергей Михайлович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, заведующий кафедрой технологии, экологии и безопасности жизнедеятельности; тел.: (057) 758-77-08; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Logvinkov Sergey Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Officer, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Head of the Department of Technology, Ecology and Safety of Vital Activity; tel.: (057) 758-77-08; Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Борисенко Оксана Миколаївна – кандидат технічних наук, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, старший викладач кафедри технології, екології та безпеки життєдіяльності; тел.: (057) 758-77-08; e-mail: Oksana.Borysenko@m.hneu.edu.ua.

Борисенко Оксана Николаевна – кандидат технических наук, Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, старший преподаватель кафедры технологии, экологии и безопасности жизнедеятельности; тел.: (057) 758 77 08; e mail: Oksana.Borysenko@m.hneu.edu.ua.

Borisenko Oksana Nikolaevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Senior Lecturer at the Department of Technology, Ecology and Safety of Vital Activity; tel.: (057) 758-77-08; e-mail: Oksana.Borysenko@m.hneu.edu.ua.

Попенко Галина Степанівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технології, екології та безпеки життєдіяльності; тел.: (057) 758-77-08; e-mail: Halyna.Popenko@m.hneu.edu.ua.

Попенко Галина Степановна - кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, доцент кафедры технологии, экологии и безопасности жизнедеятельности; тел.: (057) 758 77 08; e-mail: Halyna.Popenko@m.hneu.edu.ua.

Popenko Galina Stepanovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associate Professor at the Department of Technology, Ecology and Safety of Vital Activity; tel.: (057) 758-77-08; e-mail: Halyna.Popenko@m.hneu.edu.ua

Івашура Андрій Анатолійович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технології, екології та безпеки життєдіяльності; тел.: (057) 758-77-08; e-mail: Andrii.Ivashura@m.hneu.edu.ua.

Ивашура Андрей Анатольевич - кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, доцент кафедры технологии, экологии и безопасности жизнедеятельности; тел.: (057) 758 77 08; e-mail: Andrii.Ivashura@m.hneu.edu.ua.

Ivashura Andrey Anatolyevich – Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associate Professor at the Department of Technology, Ecology and Safety of Vital Activity; tel.: (057) 758-77-08; e-mail: Andrii.Ivashura@m.hneu.edu.ua.

