

УДК 546.47.221:542.3.91.54-162:536.46

Д. Д. Полищук

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, ул. Дворянская, 2,
Одесса, Украина, 65082, e-mail: Polishchukdd@ukr.net

КИНЕТИКА РЕАГИРОВАНИЯ В РЕЖИМЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В ПРЕДВОСПЛАМЕНИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Экспериментально изучены процессы превращения в предвоспламенительный, предпламенный период систем, существенно отличающихся факторами, лимитирующими синтез. Определены температуры воспламенения для шихты смеси порошков систем Zn-S, Zn-Se, Ti-C, 3Ni-Al. С использованием методики решения обратной задачи горения определены энергии активации процессов, лимитирующих их воспламенение.

Ключевые слова: синтез, воспламенение, кинетика, энергия активации.

Номенклатура продуктов технологического горения, в том числе с новыми технологическими свойствами, в частности, в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1,2] давно превысила тысячу наименований. Однако, более широкое внедрение регламентов на основе СВС затруднено необходимостью в каждом конкретном случае проводить полномасштабное исследование процесса распространения тепловой волны, включая эксперименты, требующие большого количества порошков исходных материалов, что не всегда оправдывается получаемым результатом. В цели работы входило методами неизотермической кинетики, в экспресс-анализе описать процессы, лимитирующие распространение тепловой волны в предпламенных зонах СВС-систем, отличающихся режимами воспламенения.

Для подобного экспресс-анализа может служить методика выявления перспектив воспламенения прессованных образцов топливных композиций в условиях стандартных стендов, используемых для изучения реагирования образцов по методу «подвешенной капли» [3].

Технологическое горение конденсированных топливных композиций, в отличие от случая газообразных компонент, ввиду неполной гомогенизации исходной шихты, характеризуется протяженными зонами активного химического превращения и, зачастую, достаточно сложными формами квазистационарных полей температур, на которых сказываются физические процессы возможных фазовых переходов (рис.1, зона III). Тем не менее, как показывают результаты многочисленных исследований, определяющим для самого факта возможного распространения тепловой волны и значений скорости распространения являются тепловые эффекты в зоне предварительного разогрева исходной шихты и значения её эффективного коэффициента температуропроводности [1, 4].

Наиболее распространенным случаем реализации тепловой волны в технологическом горении, исключая случаи с определяющей ролью газовой фазы (фильтрационное горение) [5, 6], есть инициирование горения (например, источником джоулева тепла) с торца цилиндрического образца шихты, которая представляет

собой перемешанную до наибольшей из возможных вариантов степени гомогенизации и после подпрессованную композицию исходных порошков [1, 2]. При этом длина образца выбирается настолько превышающей поперечный размер, чтобы в процессе распространения тепловой волны достигались условия стационарного горения [4].

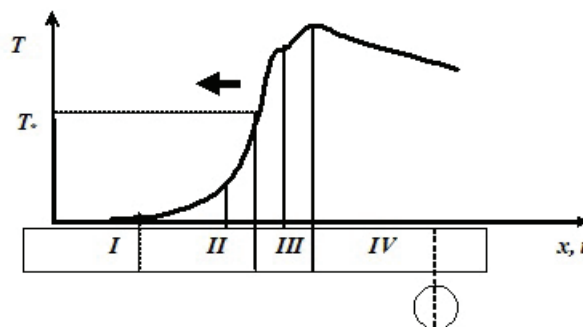


Рис. 1. Типичное стационарное поле температур во фронте тепловой волны СВС по цилиндрическому образцу шихты.

Выделены зоны: I – исходной, непрогретой смеси, II – предпламенного, предвоспламенительного разогрева, III – активного, самоподдерживающегося реагирования (горения), IV – догорания и образования продуктов.

Как видно из представленного на рис. 1 характерного поля температур, условием перехода реакции к горению во фронте тепловой волны будет достижение некоей критической температуры (удобно называть ее температурой инициации¹ T_*), отмечаемой по перегибу кривой, при достижении значения которой обеспечивается переход реакции в самоподдерживающийся режим (по крайней мере, во фронте горения). Вне зависимости от типа реализуемых химических реакций, температура инициации, как показывает практика, не бывает ниже уровня температур во фронте $T=1000\div 1500\text{K}$. Последнее обстоятельство позволило, в свое время, одному из авторов технологии СВС, Мержанову [7] определить, в первом приближении, такой уровень разогрева шихты как необходимое и достаточное условие распространения тепловой волны. Действительно, даже в случае достижения хотя бы одним из компонентов уровня фазового перехода, как это, например, было показано авторами [8-12], реакция лимитируется либо нарастающим слоем продукта, разделяющим исходные вещества, либо оксидной пленкой, как правило, всегда покрывающей металлические частицы (рис. 2).

Анализ возможных вариантов воспламенения показал, что металлические частицы, окруженные защитным слоем из продукта реагирования, могут воспламеняться в случае нелинейной, значительно опережающей теплоотвод, зависимости тепловыделения от температуры [13]. Такой случай (наиболее встречаемый и характерный для реагирования практически всех металлов в газообразном окислителе) принято согласно классификации, предложенной автором [14] называть воспламенением первого рода. Во втором случае (согласно идее автора), скорость

¹ В отличие от температуры воспламенения, под которой обычно понимают температуру среды, при которой происходит переход в самоподдерживающийся режим.

тепловыделения может резко возрасти за счет физических изменений защитного барьера, например, увеличения скорости диффузионного переноса при плавлении, сублимации или испарении, по крайней мере, одного из компонент реагирующей системы или механическом разрушении (появления трещин) защитного слоя.

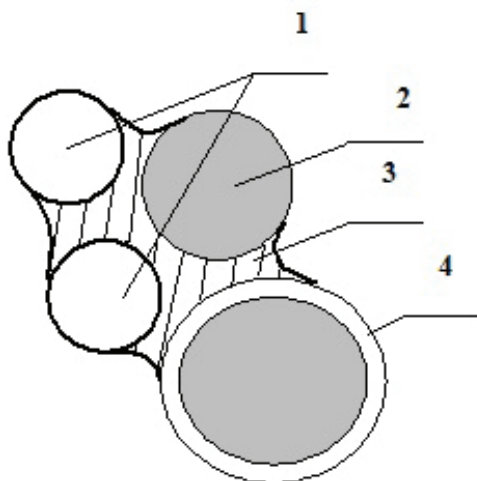
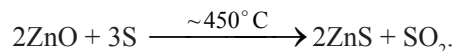


Рис. 2. Схематическое представление частиц компонента шихты в период предпламенного реагирования. 1, 2 – частицы исходных компонент, 3 – продукт реакции, 4 – слой оксида на поверхности металлической частицы.

Такая ситуация складывается, например, при реагировании частиц цинка с серой [3, 8, 9, 11]. Во-первых, при нагревании сера плавится, что существенно ускоряет процессы массопереноса, но главное, что при повышении температуры сера начинает вытеснять кислород в защитном изначальном покрытии частиц металла оксидом ZnO, тем самым разрушая барьер активному реагированию:



Этот случай можно назвать воспламенением второго рода.

Изучение детального механизма реагирования СВС-систем на основе порошков углерода и титана позволило авторам [12] предложить модель еще более сложного механизма ускорения реагирования, который, продолжая классификацию [14], можно назвать воспламенением третьего рода. Согласно идее авторов, один из реагентов (углерод) перемещается по поверхности второго (титана) и, внедряясь в образовавшуюся в месте точечного реагирования зону, проделывает в ней каналы (трещины), тем самым, за счет движения и увеличения площади контакта, ускоряет процесс поставки реагента в зону активного превращения.

В любом из рассмотренных случаев скорость превращения можно, по мнению авторов, описать экспоненциальной зависимостью Аррениуса от температуры, как наиболее универсальной и хорошо описывающей как кинетические, так и массообменные факторы, определяющие скорость реагирования. Разумеется, это всего лишь брутто-форма закона реагирования с неким эффективным значением энергии активации (E_a). Однако при построении математической модели, включающей уравнения теплового и массового баланса, для численных расчетов нет необходимости отыскания более реального описания процесса реагирования.

Методика эксперимента

Методика эксперимента подробно описана в работе [3]. В ходе опытов использовалась трубчатая электропечь, через алундовый цилиндрический канал диаметром 3 см, которой продувался инертный газ (азот или аргон). Температура на срезе печи измерялась хромель-алюмелевой термопарой и задавалась в пределах 300÷1300 К. Шихта для изготовления образцов готовилась при смешении исходных порошковых материалов в керамических ступках. Перемешанные стандартные промышленные порошки прессовались в специальных разборных формах при давлении пуансона до 2000 кГ/см², что позволяло держаться частицам компонент в достаточно крепкой упаковке. Сформированные на тонком металлическом подвесе (диаметром много меньше характерного размера реагирующих систем) образцы прессованной шихты вводились на срез печи с заранее установленным уровнем температур. Сами образцы доводились до необходимого размера (1,5 ÷ 4 мм) с помощью механической обработки. Факт воспламенения фиксировался по появлению яркого свечения образца, которое в дальнейшем, зачастую, сопровождалось перегоранием подвеса и падением образца с последующим догоранием вне зоны обдува инертным газом. Однако самого факта интенсивного реагирования достаточно для определения условий воспламенения. Организация опытов предусматривала пошаговую фиксацию температуры с отличием в 25 К. Каждому уровню соответствовала серия опытов с разными размерами образцов. Температура воспламенения фиксировалась как усредненная между двумя уровнями, отличающимися уверенно отмечаемым срывом теплового равновесия и практически инертным прогревом образцов.

Результаты и их обсуждение

Как показали экспериментальные исследования воспламенения композиций порошков Zn-S, Zn-Se, Ti-C, 3Ni-Al, уровень температур воспламенения не превышает 1200 К. Оценочное исследование проводилось и с системой Zn-Te. Но на проведение полноценной серии не хватило достаточно редких порошков теллура. Тем не менее, можно утверждать, что уровень температур воспламенения для этой системы составляет ~1000 К.

Вид зависимости (рис. 3) температуры воспламенения (в данном случае, это температура (T_{∞}) – газовой среды, при которой наблюдается срыв теплового равновесия) от размеров образцов (d) позволил предположить, что их воспламенение во многом подобно воспламенению конгломератов частиц металлов с равнодоступной для газообразного окислителя поверхностью [15, 16]. Это может быть объяснено превышением скорости роста тепловыделения в объеме образца ($Q_{+} \sim R^3$) над скоростью роста теплопотерь с внешней поверхности ($Q_{-} \sim R^2$). Следует отметить, что наиболее крупные образцы немного выпадают из тенденции поведения зависимости, что, вероятно, связано с увеличивающейся ролью теплообмена излучением.

Эти соображения позволили предположить возможность решения обратной задачи горения, т.е. определение закона реагирования по поведению характеристик воспламенения небольших образцов прессованной шихты ранее упомянутых исследуемых материалов [17]. Для этого можно воспользоваться модельной схемой воспламенения авторов [16]. Действительно, в процессе реагирования металлизированные системы успевают разогреться по всему объему.

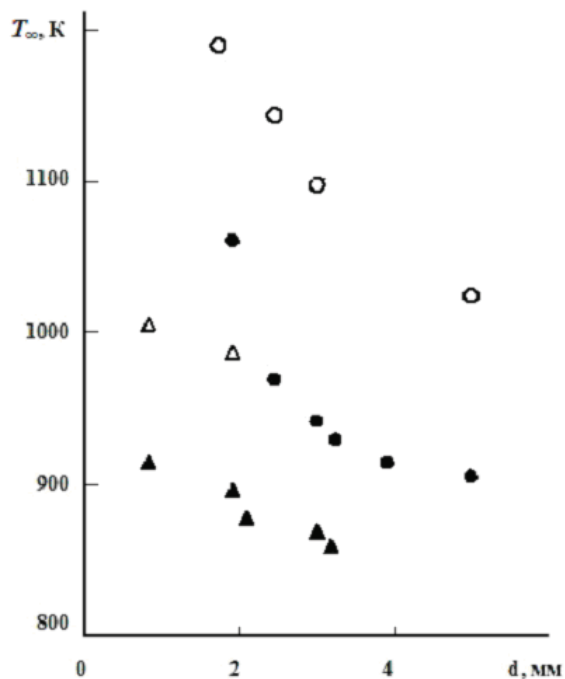


Рис.3. Зависимость температуры воспламенения (T_{∞}) от диаметра образцов (d) состава: \circ – Ti-C, Δ – Zn-Se, \blacktriangle – Ni-Al, \bullet – Zn-S.

Рассчитанные значения критерия Био ($Bi \approx \frac{\lambda_g}{\lambda_r} \ll 1$, где λ_g – коэффициент теплопроводности газовой среды, а λ_r – коэффициент теплопроводности металлического, в основе, образца) подтверждают такое допущение. Температура внутри образцов практически одинакова, что обеспечивает активное тепловыделение по всему объему. В таком случае, система уравнений теплового и массового баланса может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} c \cdot \rho_o \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = Q \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{dh}{dt} - \alpha \cdot S_o \cdot (T - T_{\infty}) \\ \frac{dh}{dt} = \frac{k(T)}{h} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \end{cases} \quad (1)$$

где V – объем образца, Q – тепловой эффект реакции, рассчитанный на единицу массы продукта, S – полная реакционная поверхность, $k(T)$ – предэкспоненциальный множитель, c – теплоемкость образца, ρ_o – плотность образца, ρ – плотность продукта, h – толщина слоя продукта, α – коэффициент теплоотдачи равен $\frac{Nu \lambda_g}{2R}$, Nu – критерий Нуссельта (в условиях опыта ≈ 2 , как в случае малых скоростей обтекающего потока), R – универсальная газовая постоянная. Здесь предполагается, что радиационные потери, ввиду невысоких температур на поверхности в момент воспламенения, незначительны по сравнению с тепловыми потерями кондуктивным потоком.

Формальное совпадение систем уравнений позволяет воспользоваться критериальной связью критических параметров в виде, предложенном авторами [16]:

$$\chi_{кр} = \left(\frac{Q \cdot \rho \cdot S \cdot E}{c \cdot V \cdot \rho_o \cdot R \cdot T_{\infty}^2} \right)^2 \frac{k \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_{\infty}}\right) \cdot 4 \cdot c \cdot \rho \cdot V}{\alpha \cdot \pi \cdot d^2} = 2,33 \quad (2)$$

Воспользовавшись зависимостями температур воспламенения от размера образцов, можно получить кинетические константы процессов реагирования рассмотренных систем. Энергии активации процессов реагирования в предвоспламенительный период, а это соответствует (рис. 3) уровню температур 700÷1200К, представлены в таблице для сравнения с известными данными других авторов. При этом заметим, что нижний предел интервала температур определялся визуально оценочно по заметному изменению цвета начинающих активно реагировать образцов.

Таблица

Значения энергии активации для исследуемых систем в интервале температур 800÷1200 К*

Реагирующие системы	Энергия активации (E_a), кДж/моль	
	Рассчитанная по формуле (2)	Литературные данные
Zn-S	75,0	70,0 [7]
3Ni-Al	96,0	33,0 [20] (500÷800К) 120,0 [21] 77,7 [7]
Ti-C	79,0	60,5 [18] 72,0 [19]

*ввиду большого разброса значений приведены округленные данные

Как видно, полученные результаты удовлетворительно согласуются с полученными другими авторами. Кроме того, значения таким образом определенной энергии активации для системы Zn-S позволило, в частности, оценить скорость (U) распространения стационарной тепловой волны в соответствии с расчетными схемами [1,4] и получить согласие с известными U_o ранее из работы [8]: $\frac{U}{U_o} \approx 0,8$ при уровне скоростей $U_o \sim 3$ см/сек.

К сожалению, в ходе подобного исследования не удастся достоверно идентифицировать тип активационного процесса, лишь формально отождествляемый с химическим превращением. Однако полученные результаты свидетельствуют, что путем экспресс-анализа можно достаточно легко оценить перспективы организации СВС для соединений, существенно отличающихся факторами, лимитирующими реагирование и структурообразование. Пользуясь получаемыми кинетическими константами можно оценить габариты образцов и иные условия, необходимые для реализации технологических регламентов, и в первом приближении оценить скорость распространения тепловой волны в этих условиях.

Литература

1. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. // Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник. / Под ред. акад. Я. М. Колотыркина. – М.: Химия, 1983. – С. 6-44.
2. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: Учеб. пособие. / Под научной редакцией В.Н. Анциферова. – М.: Машиностроение, 2007 – С. 126.
3. Золотко А.Н., Захария А.Н., Полищук Д.Д. и др. Кинетика высокотемпературного реагирования смесевых газифицирующихся систем на примере шихты Zn-S // Физика аэродисперсных систем. – 1989. – Вып. 32. – С. 65-69.
4. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М. Наука: 1980. – С. 478.
5. Сеплярский Б.П. Закономерности зажигания пористых тел в условиях встречной нестационарной фильтрации газа // Физика горения и взрыва. – 2000. – №4. – С. 23-30.
6. Глазов С.В., Салганский Е.А., Кислов В.М. и др. Перестройка структуры волны фильтрационного горения при смене состава топлива // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 52-56.
7. Мержанов А.Г. Проблемы технологического горения. В сб. Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, ОИХФ АН СССР. – 1975. – С. 5-28.
8. Писарський В.П., Поліщук Д.Д., Козицький С.В. Механізми високотемпературного реагування системи Zn-S та властивості матеріалу // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1994. – Т.30, №6. – С. 52-58.
9. Козицький С.В., Писарський В.П., Поліщук Д.Д. и др. Химический состав и некоторые свойства сульфида цинка, синтезированного в волне горения // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1990. – Т.26, №12. – С.2472-2475.
10. Козицький С.В., Писарський В.П., Поліщук Д.Д. Отримання ZnSe методом самопоширюваного високотемпературного синтезу // Фізика і хімія твердого тіла. – 2003. – Т.4, №2. – С. 229-233.
11. Козицький С.В., Писарський В.П., Поліщук Д.Д. Особливості отримання полікристалів ZnS методом самопоширюваного високотемпературного синтезу // Фізика і хімія твердого тіла. – 2003. – Т.4, №4. – С.749-753.
12. Александров В.В., Корчагин М.А. О механизме и макрокинетике реакций при горении СВС-систем// Физика горения и взрыва – 1987 – №5 – С.55-63.
13. Хайкин Б.И., Блошенко В.Н., Мержанов А.Г. О воспламенении частиц металлов // Физика горения и взрыва. – 1970. – №4. – С.474-488.
14. Барзыкин В.В. Тепловой взрыв при линейном нагреве // Физика горения и взрыва. – 1973. – №1. – С.37-54.
15. Полищук Д.И., Шевчук В.Г., Великанова В.Л. и др. Критические условия воспламенения конгломератов частиц алюминия // Физика горения и взрыва. – 1972. – №2. – С. 53-56.
16. Шевчук В.Г., Золотко А.Н., Полищук Д.И. Воспламенение конгломератов частиц бора // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т.11, №2. – С. 218-223.
17. Мержанов А.Г. Неизотермические методы в химической кинетике// Физика горения и взрыва. – 1973. – Т.9, №1. – С.4-36.
18. Иванов М.Б., Манохин С.С., Нечаенко Д.А., Колобов Ю.Р. Особенности кристаллической структуры дисперсных карбидов в альфа-титане // Известия ВУЗов. Физика. – 2011. – №7. – С. 19-25.
19. Нечаенко Д.А., Иванов М. Б., Манохин С.С. Определение влияния легирования углеродом на механические свойства йодидного титана // 51-ая Международная конференция «Актуальные проблемы прочности». – Харьков, 2011. – С. 180.
20. Корчагин М.А., Филимонов В.Ю., Смирнов Е.В., Ляхов Н.З. Тепловой взрыв механически активированной смеси 3Ni+Al // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т.46, №1. – С.48-53.
21. Ковалев О.Б., Неронов В.А. Металлохимический анализ реакционного взаимодействия в смеси порошков никеля и алюминия // Физика горения и взрыва. – 2004. – №2. – С.52-60.

Стаття надійшла до редакції 08.10.15

Д. Д. Поліщук

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082; e-mail: polishchukdd@ukr.net

**КІНЕТИКА РЕАГУВАННЯ В РЕЖИМІ
САМОПОШИРЮЮЧОГОСЬ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
СИНТЕЗУ У ЧАС ДО СПАЛАХУВАННЯ**

Дослідницьким шляхом вивчені процеси перетворення у час до спалахування систем, які істотно відрізняються лімітуючими синтез факторами. Визначені температури спалахування для шихти суміші порошків систем Zn-S, Zn-Se, Ti-C, 3Ni-Al. Для тих самих процесів, із використанням методики рішення оберненої задачі горіння, визначені енергії активації процесів, які лімітують спалахування.

Ключові слова: синтез, спалахування, кінетика, енергія активації

D. D. Polishchuk

Odessa I.I. Mechnikov National University, Dvoryanskaya str., 2,
Odessa, 65082, Ukraine; e-mail: polishchukdd@ukr.net

**REACTION KINETICS SELF-PROPOGATION REGIME DURING
PRE-IGNITION PERIOD**

Self-propagation high temperature synthesis (SHS) technological regulations application is mainly limited by transformation processes taking place in the pre-ignition period. Zn-S, Zn-Se, Ti-C and 3Ni-Al small sample systems ignition experimental study was carried out under heating conditions in inert atmosphere with temperature values $T = 1200\text{K}$.

It was shown that at this temperature level a chemical reaction can be initiated, turning into a self-sustaining mode. Wherein the reaction limiting factors can be mass transfer processes. Ignition temperatures were determined and plotted via the samples size. A physical ignition model was developed assuming the pre-ignition period limiting reaction Arrhenius law.

The inverse combustion problem solution made it possible to calculate the low-temperature ($T = 800 \div 1200\text{K}$) reaction kinetic constant values. Comparison thus obtained values with the known data of other researchers showed their good agreement.

Activation energy values for the Zn-S system were used to calculate the heat wave propagation speed. This value appeared to coincide with experimental values.

Obtained results analysis leads to the conclusion about the availability and justification for the proposed method of express-analysis of presupposed, but previously not studied SHS systems. The results thus obtained allow us to estimate conditions for the SHS technology implementation, the reactor characteristic sizes and the thermal wave's propagation speed.

Keywords: synthesis, ignition, kinetics, activation energy.

REFERENCES

1. Merzhanov A.G. *Samorasprostranjajushhijjsja vysokotemperaturnyj sintez*. Fizicheskaja himija. Sovremennye problemy. Ezhegodnik. Pod red. akad. Ja. M. Kolotyrkina. Moscow: Himija, 1983, pp. 6-44. (in Russian).
2. Amosov A.P., Borovinskaja I.P., Merzhanov A.G. *Poroshkovaja tehnologija samorasprostra-njajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza materialov*: Ucheb. posobie. / Pod nauchnoj re-dakciej V.N. Anciferova, Moscow: Mashinostroenie, 2007, pp. 126. (in Russian).

3. Zolotko A.N., Zaharija A.N., Polishhuk D.D. i dr. *Kinetika vysokotemperaturnogo reagirovanija smesevyh gazificirujushhhsja sistem na primere shihty Zn-S*. Fizika ajerodis-persnyh system, 1989, no. 32, pp. 65-69. (in Ukrainian).
4. Zel'dovich Ja.B., Barenblatt G.I., Livrovich V.B., Mahviladze G.M. *Matematicheskaja teorija gorenija i vzryva*. – Moscow: Nauka, 1980, pp. 478. (in Russian).
5. Sepljarskij B.P. *Zakonomernosti zazhiganiya poristih tel v uslovijah vstrečnoj nestaci-onarnoj fil'tracii gaza* Fizika gorenija i vzryva, 2000, no 4, pp. 23-30. (in Russian).
6. Glazov S.V., Salganskij E.A., Kislov V.M. i dr. *Perestrojka struktury volny fil'traci-onnogo gorenija pri smene sostava topliva* Fizika gorenija i vzryva, 2010, vol. 46, no 3, pp. 52-56.
7. Merzhanov A.G. *Problemy tehnologicheskogo gorenija*. V sb. Processy gorenija v himicheskoj tehnologii i metallurgii. Chernogolovka, OIHF ANSSSR, 1975, pp. 5-28. (in Russian).
8. Pisars'kij V.P., Polishhuk D.D., Kozic'kij S.V. *Mehanizmi vysokotemperaturnogo reagu-vannja sistemi Zn-S ta vlastivosti materialu* Fiziko-himichna mehanika materialiv, 1994, vol.30, no 6, pp. 52-58. (in Ukrainian).
9. Kozic'kij S.V., Pisars'kij V.P., Polishhuk D.D. i dr. *Himicheskij sostav i nekotorye svojs-tva sul'fida cinka, sintetizirovannogo v volne gorenija* Izvestija AN SSSR. Neorgani-cheskie materialy, 1990, vol. 26, no12, pp.2472-2475. (in Russian).
10. Kozic'kij S.V., Pisars'kij V.P., Polishhuk D.D. *Otrimannja ZnSe metodom samoposhirju-vanogo vysokotemperaturnogo sintezu*. Fizika i himija tverdogo til, 2003, vol.4, no 2, pp. 229-233. (in Ukrainian).
11. Kozic'kij S.V., Pisars'kij V.P., Polishhuk D.D. *Osoblivosti otrimannja polikristaliv ZnS metodom samoposhirjuvanogo vysokotemperaturnogo sintezu* Fizika i himija tverdogo tila, 2003, vol.4, no 4. pp. 749-753. (in Ukrainian).
12. Aleksandrov V.V., Korchagin M.A. *O mehanizme i makrokinetike reakcij pri gorenii SVS-sistem*. Fizika gorenija i vzryva, 1987, no5, pp. 55-63. (in Russian).
13. Hajkin B.I., Bloshenko V.N., Merzhanov A.G. *O vosplamenenii chastic metallov*. Fizika gorenija i vzryva, 1970, no 4. pp.474-488. (in Russian).
14. Barzykin V.V. *Teplovoj vzryv pri linejnom nagreve*. Fizika gorenija i vzryva. 1973, no 1. – pp. 37-54. (in Russian).
15. Polishhuk D.I., Shevchuk V.G., Velikanova V.L. i dr. *Kriticheskie uslovija vosplamenenija konglomeratov chastic aljuminija* Fizika gorenija i vzryva, 1972, no 2. pp. 53-56. (in Russian).
16. Shevchuk V.G., Zolotko A.N., Polishhuk D.I. *Vosplamenenie konglomeratov chastic bora* Fizika gorenija i vzryva, 1975, vol. 11, no 2. pp. 218-223. (in Russian).
17. Merzhanov A.G. *Neizotermicheskie metody v himicheskoj kinetike*. Fizika gorenija i vzryva, 1973, vol.9, no 1. pp. 4-36. (in Russian).
18. Ivanov M.B., Manohin S.S., Nechaenko D.A., Kolobov Ju.R. *Osobennosti kristalliche-skoj struktury disper-snyh karbidov v al'fa-titane* Izvestija VUZov. Fizika, 2011, no7. pp. 19-25. (in Russian).
19. Nechaenko D.A., Ivanov M.B., Manohin S.S. *Opredelenie vlijaniya legirovanija ugljerodom na mehanicheskie svojstva jodidnogo titana* 51-aja Mezhdunarodnaja konferencija «Aktual'nye problemy prochnosti». Har'kov, 2011, pp. 180. (in Russian).
20. Korchagin M.A., Filimonov V.Ju., Smirnov E.V., Ljahov N.Z. *Teplovoj vzryv mehanicheski aktivirovannoj smesi 3Ni+Al* Fizika gorenija i vzryva, 2010, vol. 46, no 1, pp. 48-53. (in Russian).
21. Kovalev O.B., Neronov V.A. *Metallohimicheskij analiz reakcionnogo vzaimodejstvija v smesi poroshkov nikelja i aljuminija* Fizika gorenija i vzryva, 2004, no 2, pp.52-60. (in Russian).