

Научная статья

УДК 532.68 + 536.46

doi: 10.17223/19988621/80/10

Периодические режимы горения термически сопряженных СВС-систем с термокапиллярным течением расплава

Вадим Геннадьевич Прокофьев

Томский государственный университет, Томск, Россия, pvg@ftf.tsu.ru

Аннотация. Проведено численное исследование нестационарных пространственных режимов безгазового горения трехслойного образца квадратного сечения с плавлением и течением инертного компонента смеси. В зависимости от относительной калорийности смеси внутреннего слоя обнаружены нестационарные периодические режимы горения. Исследованы квазистационарные режимы управления и слияния при горении образца с активным внутренним слоем, когда средние собственные скорости горения донорной и акцепторной смесей близки.

Ключевые слова: СВС, плавление, термокапиллярное течение, донорная и акцепторная смеси

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания FSWM-2020-0036.

Для цитирования: Прокофьев В.Г. Периодические режимы горения термически сопряженных СВС-систем с термокапиллярным течением расплава // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 80. С. 108–116. doi: 10.17223/19988621/80/10

Original article

Periodic combustion regimes for thermally coupled SHS systems with a thermocapillary melt flow

Vadim G. Prokof'ev

Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, pvg@ftf.tsu.ru

Abstract. This paper presents a three-dimensional mathematical model of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of a three-layer “sandwich” sample. The layers are formed from gasless mixtures with the addition of an inert fusible component. The mathematical model is studied numerically using the finite-difference method. The unsteady periodic regimes of gasless combustion of the three-layer sample with square cross-section are revealed with account for melting and thermocapillary flow of the melted inert component of the mixture. The unsteady periodic combustion regimes are specified depending on the relative calorific value of the mixture in the inner layer. High-temperature points move

along the side faces of the sample. The velocity of the points' motion along the combustion surface is much higher than the average burning velocity of the sample. An increase in the melt flow velocity leads to the equalization of the temperature field and stabilization of the combustion regime. The quasi-stationary regimes of control and fusion are studied during the combustion of the sample with an active inner layer, when the intrinsic burning velocities of the donor and acceptor mixtures are close to each other.

Keywords: SHS, melting, thermocapillary flow, donor and acceptor mixtures

Acknowledgments: This research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2020-0036).

For citation: Prokof'ev, V.G. (2022) Periodic combustion regimes for thermally coupled SHS systems with a thermocapillary melt flow. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 108–116. doi: 10.17223/19988621/80/10

Введение

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является эффективным методом получения функционально-градиентных соединений и слоевых композиций из порошковых материалов. СВС-процесс в слоевой системе по предложению А.Г. Мержанова был назван чисто термически сопряженным [1]. Исследуемый образец представляет собой совокупность нескольких теплосопреженных друг с другом слоев, выполненных из смесей с различным теплосодержанием с добавлением легкоплавкого инертного металла-пластификатора. Подобная форма образца позволяет для двух разных СВС-систем создать благоприятные условия таким образом, что более калорийная система при одновременном протекании реакций подогревает вторую – менее калорийную. Поэтому реакцию в первой системе предложено называть донорной, а во второй – акцепторной [1]. В качестве вспомогательных, или донорных, слоев, используются высококалорийные металлотермитные или безгазовые составы с температурами горения 1 500–4 000 К [2, 3]. Тепло от донорных слоев поступает в основной, или акцепторный, слой синтеза для дополнительного нагрева реагентов. Одномерное математическое моделирование безгазового горения слоевой системы, один из слоев которой состоит из инертного легкоплавкого металла, а другие части выполнены из высокоэнтальпийного безгазового состава, представлено в [4]. В статье рассмотрен процесс капиллярного смачивания пористых продуктов горения внешних слоев расплавом металла внутреннего слоя в зависимости от параметров задачи. Двумерное и трехмерное моделирование СВС-процессов напрямую связано с неустойчивостью распространения пространственных волн безгазового горения, в частности так называемых спиновых волн безгазового горения [5–9]. В [10] для однородного образца цилиндрической формы в рамках трехмерной модели исследовано влияние термокапиллярного течения на спиновые режимы горения. В [11] анализируется развитие неустойчивости распространения фронта горения в зависимости от уровня теплопотерь с боковой поверхности образца и его толщины. Теоретическое исследование синтеза в двухслойном образце, один слой которого донорный, другой – акцепторный, выполнено в [12]. Спиновые волны горения наблюдаются в экспериментах при неустойчивом распространении фронта экзотермической реакции в безгазовых и малогазовых системах [13–16].

В настоящей работе рассматривается трехмерная математическая модель высокотемпературного синтеза слоистых металлокомпозитов, получаемых из образцов в виде стержней прямоугольного сечения с учетом конвективного течения расплава. Слои выполнены из реакционных смесей, отличающихся только тепловыми эффектами: донорные и акцепторные смеси. Снижение теплового эффекта смеси в практике CBS получают разбавлением шихты продуктами реакции с целью снижения температуры горения.

Математическая модель

Наиболее типичным примером слоистой композиции является плоский трехслойный пакет (сэндвич) прямоугольного сечения в форме прямого параллелепипеда. Параметры и состав внешних донорных слоев предполагаются одинаковыми, а внутренний акцепторный слой однороден по составу и макроструктуре. Реакции в слоях в химическом отношении протекают независимо. Внешние слои передают тепловую энергию внутреннему слою, ускоряя в нем синтез продуктов. Теплофизические характеристики всех компонентов смеси, включая инертный, и продукта реакции полагаются равными. Появление жидкой фазы не влияет на механизм синтеза. Область термокапиллярного течения расплава ограничена температурами плавления (во фронте горения) и кристаллизации (в продуктах горения). На границах между слоями предполагается идеальный тепловой контакт и осуществляется режим сопряженного теплообмена. В плоскости верхнего основания образца-параллелепипеда в результате кратковременного контакта всех слоев с нагретой стенкой формируется волна горения, распространяющаяся вниз по образцу (рис. 1).

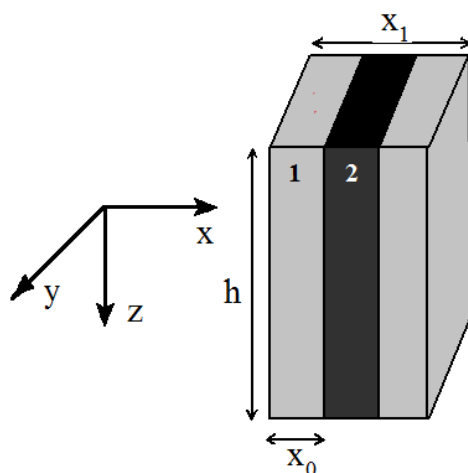


Рис. 1. Схема образца: 1 – донорный слой, 2 – акцепторный слой

Fig. 1. Structure of a sample: (1) donor and (2) acceptor layers

Уравнения математической модели высокотемпературного синтеза записываются в декартовой системе координат в безразмерном виде:

$$[1 + \varepsilon Ph \delta_D (\theta_1 - \theta_L)] \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + \varepsilon Ve (\theta_1 - \theta_L) [1 + Ph \delta_D (\theta_1 - \theta_L)] \nabla \theta_1 = \Delta \theta_1 + \frac{(1 - \varepsilon)}{\gamma} \frac{\partial \eta_1}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$[1 + \varepsilon Ph \delta_D(\theta_2 - \theta_L)] \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} + \varepsilon V e(\theta_2 - \theta_L) [1 + Ph \delta_D(\theta_2 - \theta_L)] \nabla \theta_2 = \Delta \theta_2 + \frac{\Omega(1 - \varepsilon)}{\gamma} \frac{\partial \eta_2}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = \gamma(1 - \eta_i) \exp\left(\frac{\theta_i}{1 + Ar \theta_i}\right). \quad (3)$$

С краевыми условиями

$$\begin{aligned} \tau = 0: \theta_i(x, y, z, 0) &= \theta_0, \eta_i(x, y, z, 0) = 0, \\ z = 0: \theta_i(x, y, 0, \tau) &= \theta_w \quad (\tau < \tau_w), \quad \partial \theta_i(x, y, 0, \tau) / \partial z = 0 \quad (\tau > \tau_w), \\ x = 0, x = x_1: \partial \theta_i(0, y, z, \tau) / \partial x &= 0, \quad \partial \theta_i(x_1, y, z, \tau) / \partial x = 0, \\ y = 0, y = y_1: \partial \theta_i(x, 0, z, \tau) / \partial y &= 0, \quad \partial \theta_i(x, y_1, z, \tau) / \partial y = 0, \\ z = h: \partial \theta_i(x, y, h, \tau) / \partial z &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Со следующими безразмерными переменными и параметрами:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{cRT_*^2}{Q_1 E}, \quad \theta_i = \frac{(T_i - T_*)E_1}{RT_*^2}, \quad \theta_L = \frac{(T_L - T_*)E_1}{RT_*^2}, \quad \theta_0 = -1/\gamma, \quad Ar = \frac{RT_*}{E}, \quad x = \frac{r_1}{r_*}, \quad y = \frac{r_2}{r_*}, \\ z &= \frac{r_3}{r_*}, \quad r_* = \sqrt{\frac{\lambda t_*}{c\rho}}, \quad t_* = \frac{cRT_*^2}{Q_1 EK(T_*)}, \quad K(T_*) = k_0 \exp(-E/RT_*), \quad \tau = \frac{t}{t_*}, \quad \tau_w = \frac{t_w}{t_*}, \\ x_1 &= \frac{R_1}{r_*}, \quad x_0 = \frac{R_0}{r_*}, \quad y_1 = \frac{R_2}{r_*}, \quad h = \frac{R_3}{r_*}, \quad Ph = \frac{Q_L}{Q}, \quad \varepsilon = \frac{m_{in}}{1 - m}, \quad V = \frac{m_i t_* V_c}{(1 - m)x_*}, \end{aligned}$$

где $T_* = T_0 + Q_1/c$ – адиабатическая температура горения донорной смеси; r_1, r_2, r_3 – декартовы координаты; t – текущее время; R_1, R_2, R_3 – размеры образца; R_0 – ширина внешнего (донорного) слоя ($2R_0 < R_1$); Q_L – теплота фазового перехода в донорной смеси; T_L – температура плавления; V_c – скорость течения расплава, существующего в интервале температур $\theta_i > \theta_L$; ρ, c, λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность; Q_i, E_i – тепловые эффекты реакции и энергия активации; $k_0, K(T_*)$ – предэкспоненциальный множитель и скорость реакции при T_* ; Ω – степень разбавления исходной смеси продуктом реакции; η_i – глубина превращения; m – пористость; m_{in} – объемная доля инертного плавящегося компонента; $\delta_D(\theta_i - \theta_L)$ – дельта-функция Дирака; $e(\theta_2 - \theta_L)$ – функция единичного скачка. Подстрочный индекс $i = 1$ относится к внешним слоям, $i = 2$ – внутренним.

Численная методика решения

Математическая модель безгазового горения трехслойного образца с учетом термокапиллярного течения расплава (1)–(4) исследовалась численно методом конечных разностей с использованием неявной схемы по координатному расщеплению и метода прогонки. На боковых гранях параллелепипеда задавались адиабатические граничные условия, которые аппроксимировались со вторым порядком. Выполнена проверка на аппроксимационную сходимость разностной схемы. Для решения задачи с фазовым переходом использовалась экономичная схема сквозного счета А.А. Самарского без явного выделения поверхности раздела фаз с процедурой сглаживания дельта-функции.

При численном решении задачи до установления режима горения по мере продвижения фронта реакции по образцу происходили наращивание расчетной

области задачи на значительном расстоянии (пять-шесть толщин прогретого слоя) от фронта со стороны свежей смеси и удаление аналогичной части расчетной области со стороны продуктов реакции. Такой метод «сдвига» вдоль оси образца экономит время численных расчетов до достижения устойчивого режима горения. Время контакта с нагретой поверхностью во всех расчетах принималось равным $\tau_{ign} = 500$. С целью ускорения процесса выхода на нестационарный периодический режим горения слоевого образца задавалось начальное возмущение температурного поля, не влияющее на характер режима горения. Значения параметров фазового перехода во всех расчетах приняты равными: $Ph = 0.6$, $\theta_L = -2.5$, $\varepsilon = 0.2$.

Математическая модель (1)–(4) позволяет рассчитать пространственные режимы горения как трехслойного образца в форме параллелепипеда, так и в предельном случае – однородного образца. Геометрически образец имеет плоскости симметрии, проходящие через центр внутреннего слоя, но условие симметрии для решения уравнений (1) и (2) не ставится. В [9] показано, что увеличение площади основания параллелепипеда приводит к сложным пространственным режимам горения с большим количеством очагов. Движение очага горения при этом может осуществляться как по спиральным траекториям вдоль боковой поверхности образца, так и по внутренним траекториям, не выходящим на боковые грани образца.

Горение трехслойного образца с активным внутренним слоем

Известно, что для успешного проведения синтеза неоднородных материалов необходимым условием является сочетание высоко- и низкокэотермических слоев. Калорийность донорного слоя должна быть значительно выше, чем у внутреннего акцепторного слоя, что обеспечивает высокую скорость нагрева внутреннего слоя. Пространственные периодические режимы горения трехслойного образца со слабо экзотермическим активным внутренним слоем более разнообразны, чем у однородного образца [8, 9]. Добавляется параметр Ω , отвечающий за калорийность реакционной смеси внутреннего слоя. Включение нового параметра задачи приводит к реализации более сложных режимов горения образца. В случае сильного различия характерных времен реакции в донорной и акцепторной смесях, например при $\Omega \sim 0.1$, волна горения по донорной смеси распространяется намного быстрее, чем по акцепторной – режим «химической печи» [1]. В этом случае численное исследование процесса с выходом на установившийся режим провести не удастся, так как постоянно растет расстояние между фронтами реакции в донорной и акцепторной смесях. При фиксированной расчетной длине образца по высоте (ось z) наступает момент, когда межфронтальное расстояние становится сравнимо или больше расчетной высоты образца h . Поэтому выбор параметра Ω ограничен режимами слияния и управления [1], для которых собственные значения скорости горения донорной и акцепторной смесей относительно близки.

Наиболее типичный вариант нестационарного периодического режима горения трехслойного образца представлен на рис. 2. Температурное поле симметрично относительно плоскости, проходящей через точку $x = x_1/2$ параллельно оси z . Изменения температурного поля и глубины превращения имеют циклический характер. Ведущая зона горения распространяется по образцу в виде парных очагов, не

выходящих за границы внешних слоев при относительно низкой калорийности внутреннего слоя $\Omega = 0.5$. Условно за начало цикла можно принять температурное поле с двумя крупными очагами в угловых точках $(0, 0)$ и $(0, y_1)$ на рис. 2, а, распространяющимися параллельно оси OX в направлении угловых вершин $(x_1, 0)$ и (x_1, y_1) . Далее через небольшой промежуток времени, равный полупериоду цикла, происходит движение этих очагов в обратном направлении (см. рис. 2, с). Движение всей фронтальной поверхности по образцу вдоль оси OZ происходит со значительно меньшей скоростью, примерно равной средней скорости горения образца топлива.

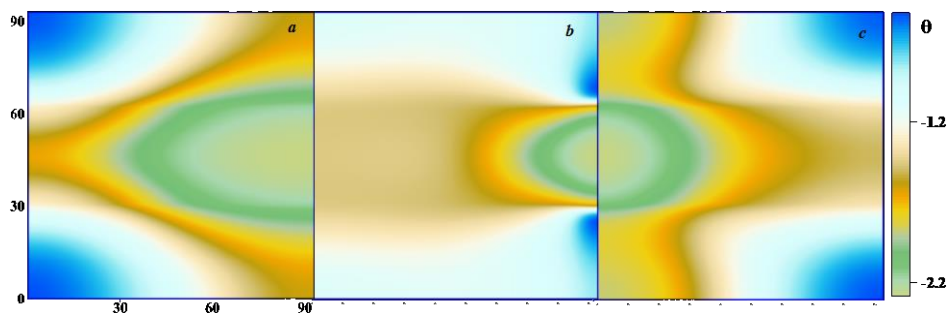


Рис. 2. Динамика температурного поля в нестационарном циклическом режиме горения трехслойного образца с низкокалорийным внутренним слоем: $x_1 = 93$, $y_1 = 93$, $x_0 = 31$, $\theta_0 = -7$, $Ar = 0.13$, $\Omega = 0.5$, $V = 0.5$: а – начало, б – развитие, с – завершение цикла

Fig. 2. Dynamics of the temperature field in the unsteady cyclic combustion regime of a three-layer sample with a low-calorie inner layer: $x_1 = 93$, $y_1 = 93$, $x_0 = 31$, $\theta_0 = -7$, $Ar = 0.13$, $\Omega = 0.5$, $V = 0.5$: (a) start, (b) extension, and (c) end of cycle

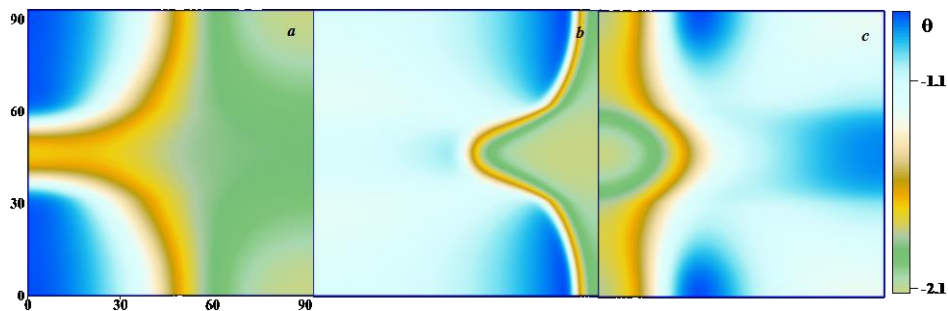


Рис. 3. Динамика температурного поля в нестационарном циклическом режиме горения трехслойного образца: $x_1 = 93$, $y_1 = 93$, $x_0 = 31$, $\theta_0 = -7$, $Ar = 0.13$, $\Omega = 0.65$, $V = 0.5$: а – начало, б – развитие, с – завершение цикла

Fig. 3. Dynamics of the temperature field in the unsteady cyclic combustion regime of a three-layer sample: $x_1 = 93$, $y_1 = 93$, $x_0 = 31$, $\theta_0 = -7$, $Ar = 0.13$, $\Omega = 0.65$, $V = 0.5$: (a) start, (b) extension, and (c) end of cycle

Увеличение калорийности реакционной смеси внутреннего слоя на 23% ($\Omega = 0.65$) приводит к периодическому режиму слияния [1], когда линейные скорости горения в плоскости образца $y = 0.5y_1$ для внутреннего и внешних слоев равны, но фронты горения в слоях могут отставать друг от друга примерно на толщину

прогретого слоя. Характерные распределения температуры в поперечном сечении образца $z = \text{const}$, соответствующие эволюции поверхности горения в течение одного цикла, представлены на рис. 3. Крупные очаги горения распространяются вдоль боковых граней образца во внешних слоях (рис. 3, *a, b*), создавая благоприятные условия для развития лидирующего очага горения во внутреннем слое (рис. 3, *c*). В течение цикла происходит чередование лидирующих очагов горения из внешних слоев в донорный и наоборот. Максимальная температура в очагах не превышает адиабатическую температуру горения донорной смеси и на 2–3 характерных интервала ниже максимальных температур в нестационарных режимах горения однородного образца [7].

С уменьшением калорийности акцепторной смеси до значений $\Omega < 0.45$ при фиксированном соотношении размеров и условий зажигания инициировать устойчивый режим синтеза трехслойного образца во фронтальном режиме не удастся. К аналогичному результату приводит и увеличение объема акцепторного слоя по отношению к объемам донорных слоев. Влияние фазового превращения на устойчивость режима горения проявляется тем сильнее, чем ближе температура плавления к адиабатической температуре горения донорной смеси $-0.5 < \theta_L < 0$ и выше скорость термокапиллярного течения расплава. В этом случае поверхность фронта реакции заметно сглаживается вследствие уменьшения градиентов температуры под действием конвективного потока. При малых скоростях термокапиллярного течения $V \ll 1$ и небольшой относительной толщине акцепторного слоя реализуются режимы, близкие к рассмотренным в [9]. С увеличением размеров образца реализуются сложные пространственные режимы горения с большим количеством очагов, численный расчет которых до установления режима горения требует значительных временных ресурсов.

Выводы

1. Предложена трехмерная модель высокотемпературного синтеза трехслойного образца в форме параллелепипеда с учетом фазового превращения компонентов и термокапиллярного течения расплава.
2. Горение трехслойного образца с низкокалорийным внутренним слоем возможно в нестационарных периодических режимах в зависимости от калорийности внутреннего слоя и скорости течения расплава.
3. Предложенная математическая модель горения слоевой системы может быть полезна для оценки оптимального соотношения объемов донорной и акцепторной смесей для синтеза металлокомпозитов во фронтальном режиме горения.

Список источников

1. Мержанов А.Г. Термически сопряженные процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Доклады РАН. 2010. Т. 434, № 4. С. 489–492.
2. Linde A.V., Studenikin I.A., Kondakov A.A., Grachev V.V. Thermally coupled SHS processes in layered $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al})/(\text{Ti} + \text{Al})/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al})$ structures: An experimental study // Combustion and Flame. 2019. V. 208. P. 364–368. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.07.010
3. Sytschev A.E., Vrel D., Boyarchenko O.D., Roshchupkin D.V., Sachkov N.V. Combustion synthesis in bi-layered $(\text{Ti-Al})/(\text{Ni-Al})$ system // Journal of Materials Processing Technology. 2017. V. 240. P. 60–67. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.010

4. Прокофьев В.Г., Лапшин О.В., Смоляков В.К. Макрокинетика горения слоевых композиций с легкоплавким инертным слоем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 52. С. 102–113. doi: 10.17223/19988621/52/10
5. Максимов Ю.М., Пак А.Т., Лавренчук Г.В., Найборошенко Ю.С., Мержанов А.Г. Спиновое горение безгазовых систем // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 3. С. 156–159.
6. Максимов Ю.М., Мержанов А.Г., Пак А.Т., Кучкин М.Н. Режимы неустойчивого горения безгазовых систем // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 4. С. 51–58.
7. Ивлева Т.П., Мержанов А.Г. Математическое моделирование трехмерных спиновых режимов безгазового горения // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 47–54. doi: 10.1023/A:1014053816863
8. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Влияние фазового перехода на трехмерные неустойчивые режимы безгазового горения // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 3. С. 65–71. doi: 10.15372/FGV20160309
9. Prokof'ev V.G., Unsteady Combustion Modes in Rectangular Rods // Int. Journal Self-Propag. High-Temp. Synth. 2019. V. 28 (3). P. 155–158. doi: 10.3103/S1061386219030099
10. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Режимы горения безгазовых систем с плавящимся компонентом в области сильной неустойчивости // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 3. С. 706–710.
11. Kurdyumov V.N., Gubernov V.V. Combustion waves in narrow samples of solid energetic material: chaotic versus spinning dynamics // Combustion and Flame. 2021. V. 229. 111407. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111407
12. Miroshnichenko T.P., Yakupov E.O., Gubernov V.V., Kurdyumov V.N., Polezhaev A.A. Combustion wave in a two-layer solid fuel system // Applied Mathematical Modelling. 2020. V. 77. P. 1082–1094. doi: 10.1016/j.apm.2019.09.037
13. Nersisyan H.H., Joo S.H., Yoo B.U., Cho Y.H., Kim H.M., Lee J.-H. Melt-assisted solid flame synthesis approach to amorphous boron nanoparticles // Combustion and Flame. 2015. V. 162. P. 3316–3323. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.05.021
14. Yeh C.L., Chen Y.C. Effects of PTFE activation and carbon sources on combustion synthesis of Cr₂AlC/Al₂O₃ composites // Ceramics International. 2018. V. 44. P. 384–389. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.187
15. Feng P., Liu W., Farid A., Wua J., Niu J., Wang X., Qiang Y. Combustion synthesis of (Mo_{1-x}Cr_x)Si₂ (x = 0.00–0.30) alloys in SHS mode // Advanced Powder Technology. 2012. V. 23. P. 133–138. doi: 10.1016/j.apm.2011.01.003
16. Yeh C.L., Wang H.J. Combustion synthesis of vanadium borides // Journal of Alloys and Compounds. 2011. V. 509. P. 3257–3261. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.12.004\

References

1. Merzhanov A.G. (2010) Thermally coupled processes of selfpropagating high-temperature synthesis. *Doklady Physical Chemistry*. 434. pp. 159–162. doi: 10.1134/S0012501610100015
2. Linde A.V., Studenikin I.A., Kondakov A.A., Grachev V.V. (2019) Thermally coupled SHS processes in layered (Fe₂O₃ + 2Al)/(Ti + Al)/(Fe₂O₃ + 2Al) structures: An experimental study. *Combustion and Flame*. 208. pp. 364–368. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.07.010
3. Sytshev A.E., Vrel D., Boyarchenko O.D., Roshchupkin D.V., Sachkov N.V. (2017) Combustion synthesis in bi-layered (Ti–Al)/(Ni–Al) system. *Journal of Materials Processing Technology*. 240. pp. 60–67. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.010
4. Prokof'ev V.G., Lapshin O.V., Smolyakov V.K. (2018) Макрокинетика горения слоевых композиций с легкоплавким инертным слоем [Macrokinetics of combustion of layered compositions with a low-melting inert layer]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 52. pp. 102–113. doi: 10.17223/19988621/52/10

5. Maksimov Yu.M., Pak A.T., Lavrenchuk G.V., Naiborodenko Yu.S., Merzhanov A.G. (1979) Spin combustion of gasless systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 15(3). pp. 415–417. doi: 10.1007/BF00785083
6. Maksimov Yu.M., Merzhanov A.G., Pak A.T., Kuchkin M.N. (1981) Unstable combustion modes of gasless systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 17(4). pp. 393–400. doi: 10.1007/BF00761208
7. Ivleva T.P., Merzhanov A.G. (2002) Mathematical simulation of three-dimensional spin regimes of gasless combustion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 38(1). pp. 41–48. doi: 10.1023/A:1014053816863
8. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2016) Effect of the phase transition on three-dimensional unstable regimes of gasless combustion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 52(3). pp. 313–319. doi: 10.1134/S0010508216030096
9. Prokof'ev V.G. (2019) Unsteady Combustion Modes in Rectangular Rods. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 28(3). pp. 155–158. doi: 10.3103/S1061386219030099
10. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2019) Regimes of combustion of gasless systems with a melting component in a strong-instability region. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 92(3). pp. 682–686. doi: 10.1007/s10891-019-01977-9
11. Kurdyumov V.N., Gubernov V.V. (2021) Combustion waves in narrow samples of solid energetic material: chaotic versus spinning dynamics. *Combustion and Flame*. 229. Article 111407. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111407
12. Mirosnichenko T.P., Yakupov E.O., Gubernov V.V., Kurdyumov V.N., Polezhaev A.A. (2020) Combustion wave in a two-layer solid fuel system. *Applied Mathematical Modelling*. 77. pp. 1082–1094. doi: 10.1016/j.apm.2019.09.037
13. Nersisyan H.H., Joo S.H., Yoo B.U., Cho Y.H., Kim H.M., Lee J.-H. (2015) Melt-assisted solid flame synthesis approach to amorphous boron nanoparticles. *Combustion and Flame*. 162. pp. 3316–3323. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.05.021
14. Yeh C.L., Chen Y.C. (2018) Effects of PTFE activation and carbon sources on combustion synthesis of Cr₂AlC/Al₂O₃ composites. *Ceramics International*. 44. pp. 384–389. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.187
15. Feng P., Liu W., Farid A., Wua, J. Niu, J. Wang X., Qiang Y. (2012) Combustion synthesis of (Mo_{1-x}Cr_x)Si₂ (x = 0.00–0.30) alloys in SHS mode. *Advanced Powder Technology*. 23. pp. 133–138. doi: 10.1016/j.apm.2011.01.003
16. Yeh C.L., Wang H.J. (2010) Combustion synthesis of vanadium borides. *Journal of Alloys and Compounds*. 509. pp. 3257–3261. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.12.004

Сведения об авторе:

Прокофьев Вадим Геннадьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: pvg@ftf.tsu.ru

Information about the author:

Prokof'ev Vadim G. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: pvg@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; принята к публикации 01.12.2022

The article was submitted 10.10.2022; accepted for publication 01.12.2022