

УДК 544.452:544.427

## ПЕРЕХОД ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ЧЕРЕЗ ФИГУРНУЮ ПРЕГРАДУ

П. М. Кришеник, С. В. Костин

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН  
142432 Черноголовка, petr@ism.ac.ru

Проведено экспериментальное исследование перехода волны горения через фигурную инертную преграду на примере горения в воздухе слоя порошка титана. Показана возможность формирования неоднородной волнообразной структуры фронта, связанной с ограниченным подводом газообразных реагентов и с тепловой неустойчивостью горения слоя порошка титана. Получены условия оптимального переходного режима горения при наличии газообразных примесей, влияющих на газообмен в зоне реакции и на устойчивость фронта в слоевой системе. Показано существование феноменологического критерия для оценки характера переходного режима горения порошка титана в зависимости от формы инертной преграды и фронта.

Ключевые слова: переходный режим горения, слоевая система, устойчивость горения, конвективный поток, горение титана.

DOI 10.15372/FGV20190603

### ВВЕДЕНИЕ

Теоретический анализ перехода волны горения через границу раздела безгазовых систем представлен в работах [1, 2], где получены критерии реализации устойчивости перехода горения через границу раздела негазифицирующихся систем. В [3] из результатов экспериментального исследования прохождения волны горения безгазовых составов через инертную преграду получены зависимости времени задержки зажигания слоя от толщины и теплофизических параметров преграды. Влияние газовой прослойки, разделяющей два химически активных слоя, на характеристики переходного процесса теоретически исследованы в [4, 5]. В [6] представлен анализ переходных режимов горения слоистых систем с учетом конкурирующих механизмов теплопередачи в газовой прослойке — кондуктивного и лучистого. Теоретически определена параметрическая область срыва волны горения при переходе через газовый зазор, даны оценки температуры и величины теплового потока на границе раздела систем к моменту завершения горения воспламенителя в условиях конкурирующих механизмов переноса тепла.

В [7] изучалось влияние перемещения продуктов горения за фронтом химической реакции в конденсированной системе при прохождении волны горения через инертную преграду.

Авторы показали, что время задержки зажигания зависит как от толщины преграды, так и от величины перемещения вещества в процессе горения. При анализе перехода волны горения через преграду из тонкой танталовой ленты отмечалось, что газофазные реакции над поверхностью реагирующей гетерогенной системы могут влиять на устойчивость переходного процесса. В [8] экспериментально исследовалось поджигание одной негазифицирующейся системы с помощью другой при автоколебательном и спиновом режимах горения слоев. Установлено, что реализация горения поджигаемой системы и характер переходного процесса зависят от степени удаленности от предела устойчивости стационарного горения в воспламенительном слое, неустойчивость горения влияет на предел переходного процесса горения в слоевой системе.

В [9–11] показано, что при потере устойчивости плоского фронта горения пористых систем возможно формирование ячеистых и неоднородных волновых режимов. Разрушение плоского фронта в параметрической области потери устойчивости горения слоя титана должно отразиться на основных закономерностях прохождения горения через инертную преграду.

В данной работе исследуется переход горения слоя порошка титана через преграду сложной конфигурации с учетом возможной потери

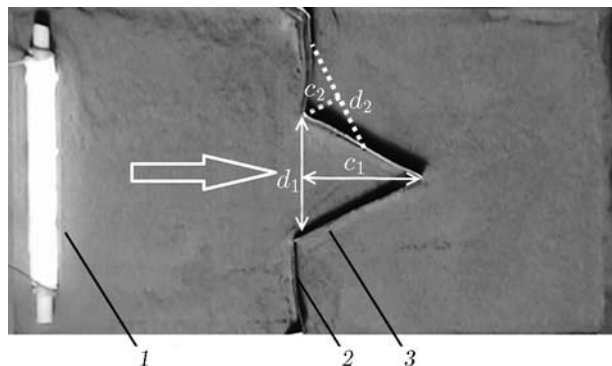


Рис. 1. Фотография поверхности образца (вид сверху):

1 — спираль для поджигания, 2 — прямая часть фигурной преграды («плечики»), внедренной в порошок титана, 3 — клиновидная часть преграды; толстая стрелка указывает направление распространения фронта горения;  $c_i$  и  $d_i$  ( $i = 1, 2$ ) — длина и ширина основания клиновидной преграды

устойчивости плоского фронта. Изучается влияние газодинамических факторов, структуры фронта горения слоя порошка титана и формы инертной преграды на распространение волны горения в многослойной системе. Исследуется переход волны горения через инертную преграду сложной конфигурации с учетом волнообразной структуры фронта, которая формируется при потере устойчивости плоского фронта. Проводится анализ влияния конвективного транспорта горючего компонента в зону реакции и теплопереноса на переходные процессы. Исследуется возможность оптимизации горения слоевых систем за счет аккумуляции тепла на границе контакта слоев. Предполагается, что анализ процессов горения в этих условиях позволит получить методы управления зажиганием и переходными процессами горения пористых слоев.

## ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

В качестве модельной системы рассматривалось горение слоя порошка титана с внедренной поперечной преградой (рис. 1). Горение реализовывалось в воздухе при нормальном давлении. Наличие примеси водорода в исходном порошке титана и примерно 1 % аргона в воздухе позволило рассмотреть лимитирующее влияние скорости газообмена на исследуемый процесс перехода волны горения через фигурную инертную преграду. В экспериментах использовался порошок титана марки ПТМ-1 с разме-

ром частиц менее 100 мкм, причем 42 % частиц было размером менее 40 мкм, содержание водорода 0.31 %. Порошок засыпался ровным слоем высотой 5 мм в прямоугольную кювету. Материал кюветы — сталь 3, габариты кюветы — длина 120 мм и ширина 64 мм, высота бортиков 5 мм, толщина дна 12 мм. Опыты проводились при температуре  $19 \div 24$  °С и абсолютной влажности воздуха  $0.01 \div 0.012$  кг/м<sup>3</sup>.

В экспериментах в слой порошка титана плотностью 1.6 г/см<sup>3</sup> внедрялась поперечная фигурная никелевая лента толщиной 0.15 мм. Лента обычно имела форму конуса с «плечиками» (см. рис. 1), острие конуса направлялось либо навстречу фронту горения, либо по направлению горения слоя порошка титана. Величина угла варьировалась. Плоские «плечики» ленты располагались поперек кюветы и касались ее боковых бортиков. Зажигание поверхности у торца слоя осуществлялось электрической спиралью с керамическим стержнем (для большей теплоемкости поджигающего элемента), размер которой был почти равен ширине поджигаемого слоя. Горение распространялось по длине кюветы от одного слоя порошка к другому, разделенному фигурной никелевой лентой. Важным параметром является время перехода через границу слоев  $\Delta t^*$  — разность времен от конца горения первого слоя до первой вспышки во второй части слоя с учетом конкретного места.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При горении горизонтального слоя порошка титана на открытой поверхности формирование восходящих над высокотемпературной зоной конвективных газовых потоков стимулирует приповерхностное течение воздуха. Эти течения препятствуют подводу активных газообразных реагентов (кислорода и азота) в зону реакции. Реализуется одно из условий потери устойчивости плоского фронта горения пористых сред — ограниченный подвод газообразных реагентов [9, 10]. В этом случае появляется возможность формирования бифронтальной волновой структуры (рис. 2), когда сразу за фронтом горения наблюдается восходящий прозрачный бесцветный парогазовый поток с образованием слабоокрашенного пламени, под которым прекращается горение слоя порошка. Следом за этой зоной наблюдается вторичный фронт с последующей зоной догорания. Формирование двух отдельных зон реакций связано с

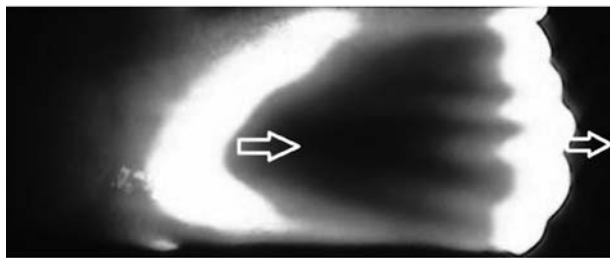


Рис. 2. Горение горизонтального плоского слоя порошка титана толщиной 2 мм на подложке из диоксида титана (вид сверху):

стрелки — направление распространения горения

аккумуляцией атмосферного аргона и выделением водорода из порошка титана, сгорающего в виде прозрачного, слабоокрашенного (из-за наличия примесей) пламени над раскаленной поверхностью полупродукта горения порошка.

Первый фронт является встречным набегающему воздушному потоку, а второй фронт — спутный. При встречной фильтрации газа глубина превращения титана в зоне реакции определяется интенсивностью переноса активного газа в зону реакции и скоростью химической реакции. Между ними над поверхностью слоя наблюдался факел с образованием паров воды как результат взаимодействия выделившегося из порошка титана водорода с кислородом воздуха.

Горение во встречном режиме, наличие восходящего парогазового потока над высокотемпературной зоной реакции и продуктов горения приводит к неполноте превращения конденсированной фазы. Нехватка активного газа в зоне реакции и теплотерии способствуют потере устойчивости плоского фронта [9–11]. При искривлении плоского фронта ускоренному сгоранию вогнутого участка, получающего большее количество тепла от продуктов горения, препятствует снижение скорости подвода окислителя из-за восходящего потока примесных газов. Напротив, выступ ведущего фронта горения имеет лучшие условия для поступления газообразного окислителя, но этому сопутствует и увеличение рассеивания тепла из зоны горения.

Очевидно, что отмеченная особенность протекания тепло- и газообмена в зоне экзотермической реакции — формирование «устойчивого» волнообразного фронта в воспламенителе — влияет на переход горения через инерт-

ную преграду.

1. Рассмотрим случай, когда фронт преодолевает поперечную преграду в виде никелевой ленты в форме клина, направленного навстречу фронту.

Форма фигурной поверхности приграничной части слоя определяет направление вектора теплового потока от раскаленных продуктов реакции в глубь еще не сгоревшей части системы.

Время преодоления преграды  $\Delta t^*$  определялось по результатам видеозаписи в области острия клина преграды (рис. 3, позиция 1) и у его основания (позиции 2 и 3). Именно на этих участках наблюдались первые вспышки за преградой. Время преодоления преграды на острие клина составляло  $\approx 12$  с, а у основания —  $2 \div 4$  с (рис. 3, а, поз. 2, 3). Как следствие, горение за преградой по краям основания клина опережает горение по центру — по местоположению острия клина. Тонкими стрелками на рис. 3 показано направление расширения границ очагов (поз. 2, 3). Опережающие боковые участки фронта сливаются между собой и подавляют отстающий участок фронта горения по центру (рис. 4, поз. 1). На прямом участке инертной преграды — «плечики» клина (см. рис. 3) — преодоление преграды не наблюдается вплоть до момента расширения очагов (см. рис. 4, поз. 2, 3). За преградой горение распространяется вдоль нее в поджигаемом слое.

Анализ поверхности продуктов горения показывает, что при горении по центру за преградой на поверхности слоя образуются оксиды

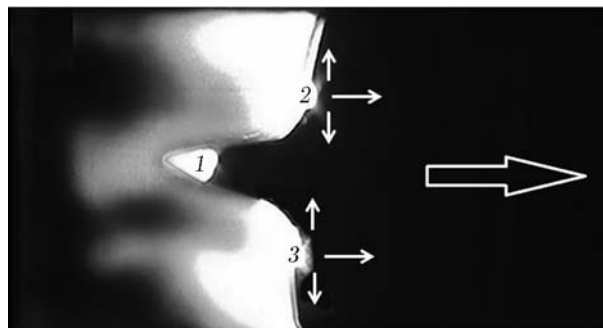


Рис. 3. Зажигание и переходный процесс горения:

тонкие стрелки — направление дальнейшего распространения горения слоя порошка титана за преградой, толстая стрелка — направление общего распространения фронта горения; 1–3 — слои титана, где формируются очаги горения за преградой

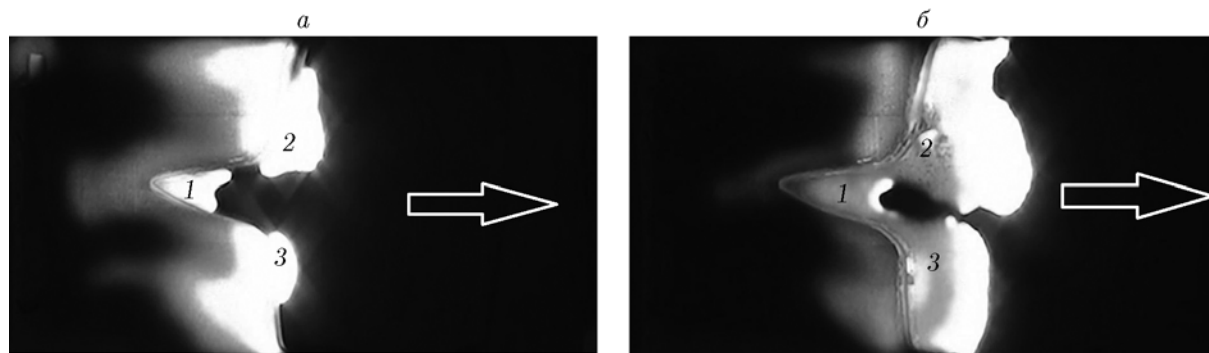


Рис. 4. Развитие горения за преградой:

*a* — 2-я секунда после формирования очагов за преградой, *б* — 6-я секунда; 1–3 — слои титана, где формируются очаги горения за преградой

титана с меньшей глубиной превращения, чем за выпуклой преградой, с образованием конечного продукта окисления — диоксида титана. Такой результат связан с тем, что зажигание слоя и переходный процесс горения за острием клиновидной преграды запаздывают из-за блокирования подвода воздуха восходящим потоком парогазовой смеси над боковыми участками с опережающим горением. Продукт горения имеет вид спеченной пластины практически без изменения линейных размеров и неоднороден по толщине слоя: на поверхности образуются оксиды разной степени окисления титана кислородом воздуха ( $Ti_2O_3$ ,  $TiO_2$ ), ниже — оксинитриды и нитриды титана, а еще ниже — непрореагировавший, частично расплавленный спекшийся порошок титана (по результатам рентгеноструктурного анализа). Формирование многослойного продукта горения связано с изменением соотношения компонентов воздушной смеси в зоне реакции на поверхности и внутри слоя порошка титана в зависимости от изменяющихся условий тепло- и массопереноса. Диапазон средней температуры в зоне реакции в нестационарном переходном процессе горения может быть оценен по состоянию продукта и никелевой ленточной преграды в границах температур плавления титана и никеля — приблизительно  $1450 \div 1670$  °С.

Использование прямой никелевой инертной ленты приводит к тому, что в этих условиях волна горения достигает границы контакта и не преодолевает ее. Теплопотери в подложку и теплоотвод в инертную преграду приводят к срыву горения в области контакта.

2. Рассмотрим переход фронта горения порошка титана через фигурную преграду в виде

клина, направленного по ходу горения.

Время преодоления преграды составляло  $\Delta t^* \approx 8 \div 9$  с (рис. 5, поз. 1, 3). При этом горение внутри клина продолжалось почти до его вершины, но не достигало его острия, что объясняется рассеиванием тепла (поз. 2). Этот результат качественно совпадает с выводами исследования горения безгазовых систем в клине [12]. Горение слоя титана в этой области лимитируется не подводом воздушной смеси в зону реакции, а теплопотерями в инертную преграду. За преградой горение начиналось от сформировавшихся у основания клина очагов (поз. 1, 3). Наблюдалось опережающее горение вдоль границы клиновидной преграды по прогретому порошку.

Таким образом, инициирование горения за преградой зависело от совокупности факто-

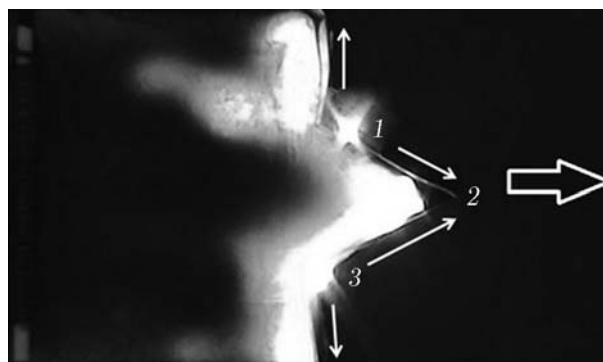


Рис. 5. Зажигание у основания клиновидной преграды:

тонкие стрелки — направление распространения горения от очагов вдоль стенок преграды, толстая стрелка — направление движения фронта; 1–3 — слои титана, где формируются очаги горения за преградой

ров — от аккумуляции тепла у основания клиновидной преграды, имеющей форму тупого угла, и от достаточного подвода воздушной смеси к этой области. Вершина клина из-за рассеивания тепла, несмотря на лучшие условия газообмена, может оказаться неблагоприятной для инициирования зажигания за преградой (для высокоактивированной экзотермической реакции).

Следовательно, развитие переходного режима гетерогенного горения зависит от параметров разнонаправленного действия при изменении кривизны преграды или ее формы. Это является препятствием для анализа характера распространения горения. Необходим обобщающий критерий для оценки совокупного результата влияния процессов тепло- и массопереноса.

### ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ФРОНТА ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ ФИГУРНУЮ ПРЕГРАДУ

Естественным феноменологическим критерием может быть кривизна линии установившегося фронта горения — радиус кривизны или его аналог, представляющий собой соотношение высоты и основания выступа ( $a_i$ ,  $i = 1, 2$ ) или впадины ( $b_i$ ,  $i = 1, 2$ ) линии фронта:  $\nu_{fr} = a_i/b_i$  (рис. 6). Влияние многообразных параметров на состояние линии фронта выражается через его геометрические характеристики, автоматически подстраивающиеся и отражающие баланс эффектов, противоположно действующих на изменение кривизны фронта  $\nu_{fr}$  и клиновидной преграды  $\nu_{br} = c_i/d_i$ ,

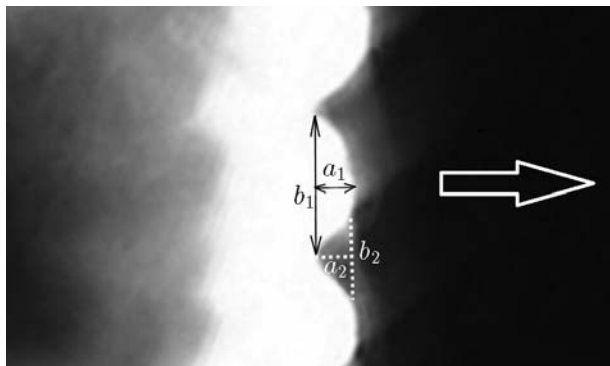


Рис. 6. Фрагмент центральной части установившегося фронта при горении слоя порошка титана в воздухе:

стрелка — направление движения фронта

где  $c_i$  — высота, а  $d_i$  — основание клина (см. рис. 1). Поэтому именно установившиеся параметры кривизны фронта рассматриваются как оптимальные для оценки условий перехода горения через фигурную преграду.

Сопоставляя геометрические характеристики элементов преграды и установившейся линии фронта, можно дать оценку переходного процесса гетерогенного горения слоевой системы. Характеризующие параметры следует учитывать для установившегося фронта горения у продольной оси образца и избегать краевых эффектов около торцов и бортиков кюветы. Из результатов опытов видно, что имеется по крайней мере два оптимальных значения и оба отличны от плоской преграды: один для выступа и один для ее впадины, размеры которых подлежат определению. Необходимые характеристики получены из анализа видеозаписи горения слоя титана начиная с момента установления формы и кривизны фронта. Для установившегося фронта горения слоя порошка титана осредненное отношение длины к ширине основания для выступа примерно равно  $\nu_{fr} = a_1/b_1 \approx 0.3$ , а для впадины —  $\nu_{fr} = a_2/b_2 \approx -0.43$ , где знак минус условно означает направление кривизны в сторону, противоположную направлению горения.

При преодолении фронта поперечной преграды в виде никелевой ленты в форме клина, направленного навстречу распространению горения (см. рис. 3, 4), отношение  $\nu_{br} = c_1/d_1$  равно приблизительно  $-1.6$ . Это значение существенно отличается от значения параметра, характеризующего впадину линии фронта,  $\nu_{fr} \approx -0.43$ . То есть значение «кривизны» клина существенно выше оптимального.

Аналогичное характеристическое отношение для углового выступа (см. рис. 4, поз. 2, 3) в основании клина  $\nu_{br} = c_2/d_2 \approx 0.26$  очень близко к значению  $\nu_{fr} = a_1/b_1 \approx 0.3$  для волнообразного установившегося фронта горения. Значение кривизны этого элемента преграды близко к оптимальному значению для выступа установившегося фронта горения. Предсказания на основе приведенных расчетов полностью соответствуют результатам эксперимента, описанного выше, т. е. зажигание у основания преграды происходило быстрее ( $2 \div 4$  с), чем внутри клина (12 с), и горение за преградой имело депрессивный характер (см. рис. 4).

Проанализируем случай, когда фронт преодолевает поперечную преграду в виде никеле-

вой ленты в форме клина, направленного вдоль распространения горения (см. рис. 5). Характеристическое отношение для угла у основания клина  $\nu_{br} \approx -0.30$  близко к значению  $\nu_{fr} \approx -0.43$  для впадины установившегося фронта горения. Именно у основания клина и наблюдалось первоначальное зажигание порошка за преградой.

Характеристическое отношение высоты к основанию клинообразной преграды из никелевой ленты равно  $\nu_{br} \approx 1.0$  (см. рис. 5), что значительно выше, чем для выступа волнообразного установившегося фронта  $\nu_{fr} \approx 0.3$ . Переходный режим горения на участке преграды с выступающим острым углом имел депрессивный характер — временное затухание горения на острие выступа даже перед преградой из-за теплопотерь (см. рис. 5, поз. 2).

## ВЫВОДЫ

Показано, что модель преграды в виде клина применима для оценки устойчивости переходного режима горения. При горении слоя порошка титана на открытой поверхности в воздушной среде восходящие потоки газа над реагирующим слоем, теплопотери, недогорание титана в зонах экзотермического превращения приводят к потере устойчивости горения и формированию фронта волнообразной формы. Предложен феноменологический критерий для оценки характера переходного режима горения в условиях разрушения плоской структуры фронта. Анализ результатов показывает, что минимальное время зажигания и развитие переходного процесса зависят как от формы инертной преграды, так и от формы фронта. Показано существование значений кривизны выступа и впадины линии фронта, при которых соблюдается оптимальное соотношение между передачей тепла кондуктивным механизмом и теплообменом в переходном режиме горения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Strunina A. G., Barzykin V. V.** Stability of transitional combustion regimes of gasless systems // *Arch. Combust.* — 1985. — V. 5, N 2. — P. 191–203.
2. **Костин С. В., Струнина А. Г., Барзыкин В. В.** Влияние теплофизических параметров на устойчивость волны горения при переходе через границу раздела безгазовых систем // *Физика горения и взрыва.* — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 56–61.
3. **Костин С. В., Струнина А. Г.** О зажигании безгазовых систем горящим воспламенителем // *Физика горения и взрыва.* — 1979. — Т. 15, № 5. — С. 19–24.
4. **Крайнов А. Ю.** Влияние теплофизических характеристик инертной преграды и теплопотерь на распространение волны горения // *Физика горения и взрыва.* — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 16–19.
5. **Boyarchenko O. D., Kostin S. V., Krishenik P. M., Rogachev S. A., Sytshev A. E.** Combustion of layered SHS systems: Thermal conditions at the interface // *Int. J. of Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 2015. — V. 24, N 3. — P. 115–118. — DOI: 10.3103/S1061386215030048.
6. **Кришеник П. М., Костин С. В., Рогачев С. А.** Устойчивость волны горения при переходе через границу раздела безгазовых систем // *Хим. физика.* — 2018. — Т. 37, № 8. — С. 52–58. — DOI: 10.1134/S0207401X18080101.
7. **Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г., Бойцов И. Е., Беляев Е. Н., Фунин В. Н., Кремзуков И. К., Малышев А. Я.** Особенности прохождения волны горения через инертную преграду в реальных конденсированных системах // *Физика горения и взрыва.* — 1998. — Т. 34, № 6. — С. 43–47.
8. **Костин С. В., Струнина А. Г., Барзыкин В. В.** Экспериментальное исследование переходных процессов горения негазифицирующихся систем в области неустойчивости стационарного режима // *Физика горения и взрыва.* — 1988. — Т. 34, № 2. — С. 32–38.
9. **Костин С. В., Кришеник П. М., Озерковская Н. И., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г.** Ячеистые режимы фильтрационного горения пористого слоя // *Физика горения и взрыва.* — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 3–13.
10. **Kostin S. V., Krishenik P. M.** Unsteady infiltration-mediated combustion in conditions of regulated quasi-isobaric flow of gaseous reagent // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 2013. — V. 22, N 2. — P. 88–92. — DOI: 10.3103/S1061386213020040.
11. **Кришеник П. М., Костин С. В., Шкадинский К. Г.** Пульсирующие ячеистые режимы фильтрационного горения пористых сред // *Хим. физика.* — 2015. — Т. 34, № 5. — С. 58–67. — DOI: 10.7868/S0207401X15050064.
12. **Stepanov B. V., Rogachev A. S.** Quenching of solid-phase combustion front of a symmetric sample by supercritical heat losses // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 1992. — V. 1, N 3. — P. 409–416.

Поступила в редакцию 04.07.2018.

После доработки 28.02.2019.

Принята к публикации 17.04.2019.