

ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ CaH_2 В ПОТОКЕ СМЕСИ $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$

© А. Ю. Лашков¹, А. Д. Буланов^{1,2}, О. Ю. Трошин^{1,2}

¹ Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН,
603951, г. Нижний Новгород, Бокс-75, ул. Тропинина, д. 49

² Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23
E-mail: lashkov@ihps-nnov.ru

Поступила в Редакцию 19 февраля 2021 г.

После доработки 21 июля 2021 г.

Принята к публикации 10 августа 2021 г.

Проведено исследование встречной и спутной волн фильтрационного горения гидрида кальция в потоке смеси тетрафторида кремния и водорода при массовой доле тетрафторида кремния 0.8, 0.85, 0.9, 0.98. Построены пространственные профили волн горения, с помощью которых установлена тепловая структура встречной и спутной волн и определена ширина каждой зоны в волне горения для различного состава газовой смеси. Ширина зоны реакции с ростом концентрации газа-реагента в потоке во встречной волне увеличивается, а в спутной волне уменьшается. Структура встречной волны соответствует переходной волне горения, а структура спутной волны – нормальной волне горения.

Ключевые слова: *тепловая структура волны; ширина зоны реакции; пространственный профиль*
DOI: 10.31857/S004446182108003X

Теория фильтрационного горения изучает волны с различной тепловой структурой [1–5]. В волне реакции выделяют три основные зоны: предпламенная зона, где в результате межфазного теплообмена происходит интенсивное тепловыделение, но химическая реакция еще не идет; зона реакции, в которой происходит взаимодействие реагентов с выделением тепла; зона остывания продуктов реакции, где химическое взаимодействие не идет и температура снижается [1]. В некоторых процессах, протекающих в спутном потоке газа, между зоной реакции и зоной продуктов формируется зона догорания, где, как и в зоне реакции, идет взаимодействие реагентов, но менее интенсивно, и тепловыделение в зоне догорания не оказывает существенного влияния на процесс. По ширине зона догорания может превосходить зону реакции и предпламенную зону [2, 3].

По расположению холодной и нагретой зон относительно зоны реакции волны горения разделяют на два основных типа: нормальная — рост температуры от начального значения до максимума происходит бы-

стрее, чем снижение от максимума до начального значения, предпламенная зона и зона реакции сопоставимы по размерам; инверсная — рост температуры, формирование предпламенной зоны, размер которой превышает размер зоны реакции, и резкое снижение температуры до начального значения по окончании реакции [3, 4]. Температура в предпламенной зоне инверсной волны может быть равна температуре в зоне реакции, но химическое взаимодействие здесь не происходит, так как активный газ полностью расходуется в зоне реакции. Существуют волны с переходной структурой, когда нагрев до максимума и остывание до начального значения происходят с примерно одинаковой скоростью [5].

Процессы горения протекают в узких и широких зонах реакции. Горение с узкими зонами реакции, когда ширина предпламенной зоны много больше ширины зоны реакции, характерно для смесей газов [6]. Узкой называется зона реакции, ширина которой меньше кондуктивной ширины, где теплоперенос осуществляется только за счет теплопроводности

твердой фазы. Горение гетерогенных составов твердое–твердое, твердое–газ и т. д. протекает в широкой зоне реакции, ширина которой больше кондуктивной ширины и сопоставима с шириной предпламенной зоны. Теплоперенос в широкой зоне реакции наряду с теплопроводностью осуществляется за счет фильтрации газа [1, 7, 8]. Авторы [8] исследовали пространственные профили горения смесей порошков металлов (Ti, Nb, Ta, Zr, Hf, Mo) с бором и установили, что горение во всех случаях протекает с широкими зонами реакции. В [9, 10] показано, что ведущими факторами формирования широкой зоны реакции являются фильтрационный перенос тепла и автоторможение реакции твердофазными продуктами.

Взаимодействие SiF_4 и CaH_2 в режиме фильтрационного горения изучалось в работах [11–13], но вопрос о тепловой структуре волны горения не рассматривался.

Цель работы — определение тепловой структуры волны фильтрационного горения CaH_2 в потоке смеси $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ и относительной ширины зоны реакции в зависимости от массовой доли газа-реагента.

Экспериментальная часть

Эксперименты по взаимодействию газообразного SiF_4 и порошкообразного CaH_2 в режиме фильтрационного горения проводили в проточном реакторе по методике, описанной в [11]. В качестве исходных реагентов использовали SiF_4 , полученный в Институте химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН по методике, описанной в [14], а также изготовленный в АО «ПО «Электрохимический завод», сертификат качества 53/5937, и CaH_2 , полученный в Институте химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН по методике [15]. В цилиндрический реактор из нержавеющей стали длиной 120 см и диаметром 5 см, внутри которого коаксиально расположена стальная труба диаметром 1.4 см с шестью хромель-копелевыми термопарами, расстояние между которыми 20 см, засыпали порошок CaH_2 (фракция 0.4–0.6 мм, насыпная плотность — $1.3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) и в направлении снизу вверх пропускали поток смеси газов (SiF_4 — газ-реагент, H_2 — газ-носитель) со скоростью 320–380 мл·мин⁻¹. Реакцию инициировали с помощью резистивной печи, расположенной вверху реактора в месте нахождения хромель-копелевой термопары № 5. Сигналы с термопар обрабатывались аналого-цифровым преобразователем ADAM-4520 и поступали в память компьютера. По окончании эксперимента строили термограмму процесса с помощью программы OriginPro-7.0 [11].

Взаимодействие реагентов протекает по реакции (1) сначала во встречной волне (распространение волны горения происходит навстречу потоку газа-реагента сверху вниз в реакторе), а затем в спутной волне (волна горения распространяется вверх по реактору совместно с потоком газообразного реагента). Эксперименты проводили при массовой доле SiF_4 в смеси 0.8, 0.85, 0.9, 0.98.

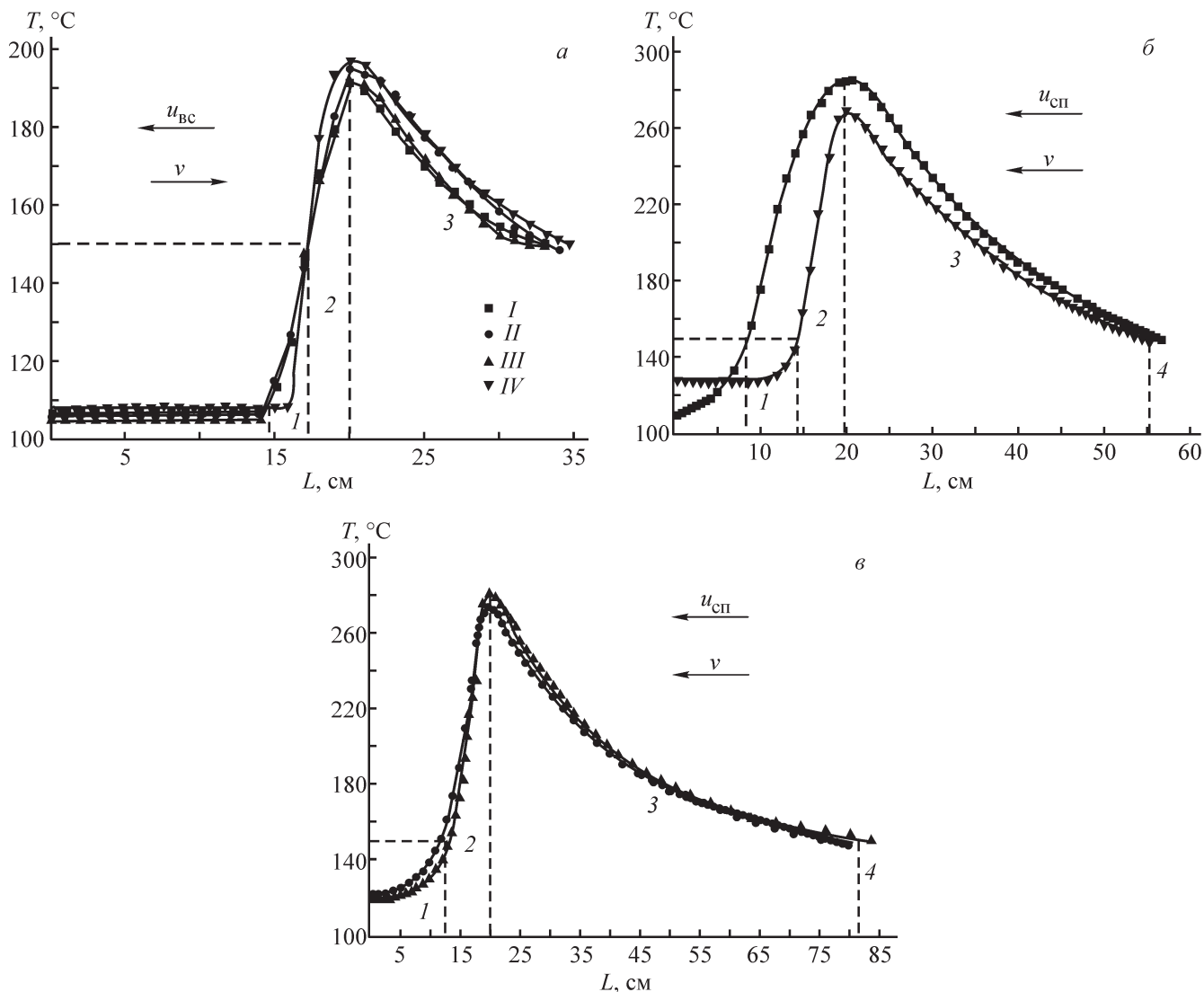


Зная линейную скорость распространения волны реакции, расстояние между соседними термопарами и значение температуры в волне в определенный момент времени, с помощью программы OriginPro-8 строили пространственный профиль волны горения — распределение температуры в волне горения по длине реактора.

Обсуждение результатов

Встречная волна (см. рисунок, *a*) состоит из трех зон: предпламенной зоны, зоны реакции и зоны остывания твердофазных продуктов. В предпламенной зоне (см. рисунок, *a*, зона 1), ширина которой ограничена моментом заметного роста температуры ($105\text{--}110^\circ\text{C}$) и начальной температурой реакции (150°C), происходит разогрев твердой фазы за счет тепла, поступающего из зоны реакции, но химическая реакция еще не идет.

В зоне реакции (см. рисунок, *a*, зона 2) по достижении 150°C происходит взаимодействие реагентов, сопровождающееся интенсивным тепловыделением, в результате которого температура достигает максимума 200°C . Зона реакции сопоставима по ширине с предпламенной зоной (3 см), и после начала реакции не наблюдается резких скачков температуры, что говорит об устойчивости волны горения и процесса в целом. SiF_4 полностью расходуется в зоне реакции, превращаясь в моносилан (SiH_4), который потоком водорода через остывающую твердую фазу (см. рисунок, *a*, зона 3) выводится из реактора, а твердая фаза остывает. Ширина зоны реакции не зависит от массовой доли реагента в потоке смеси газов (см. рисунок, *a*), однако при массовой доле SiF_4 в смеси 0.98 наблюдается более резкий рост температуры, и предпламенная зона оказывается меньше по размеру, чем при массовых долях SiF_4 0.8, 0.85 и 0.9. Вследствие более интенсивного тепловыделения растет линейная скорость распространения волны реакции [13], и времени на разогрев прилегающих слоев CaH_2 требуется меньше, температура растет быстрее.



Пространственные профили волны горения CaH_2 в SiF_4 .

v — направление движения потока смеси газов; u_{BC} — скорость распространения встречной волны; $u_{\text{СП}}$ — скорость распространения спутной волны.

a — встречная волна (1 — предпламенная зона, 2 — зона реакции, 3 — зона продуктов реакции), массовая доля SiF_4 в потоке смеси: I — 0.8, II — 0.85, III — 0.9, IV — 0.98; *б* — спутная волна (1 — предпламенная зона, 2 — зона реакции, 3 — зона догорания, 4 — зона твердофазных продуктов реакции), массовая доля SiF_4 в потоке смеси: I — 0.8, II — 0.98; *в* — спутная волна (1 — предпламенная зона, 2 — зона реакции, 3 — зона догорания, 4 — зона твердофазных продуктов реакции), массовая доля SiF_4 в потоке смеси: II — 0.85, III — 0.9.

После прохождения встречной волны происходит «отражение» волны горения от торца реактора, и в реакторе формируется и самораспространяется спутная волна горения (см. рисунок, б, в), которая по структуре и размеру зон отличается от встречной. Предпламенная зона и зона реакции в спутной волне в 2–4 раза больше, чем во встречной. Выделяющееся при химической реакции тепло фильтрующимся газовым потоком переносится из зоны реакции в прилегающие слои твердой фазы, нагревая их. При увеличении содержания газа-реагента в потоке смеси

растет линейная скорость волны горения [13], тепловыделение интенсифицируется, прогревая более широкий слой твердой фазы — ширина зоны 1 (см. рисунок, б, в) увеличивается. Но при этом нагрев от начальной температуры реакции до максимальной происходит быстрее, и с ростом содержания SiF_4 в потоке ширина зоны 2 уменьшается.

В спутной волне к трем вышеупомянутым зонам добавляется зона 4 — зона догорания, которая находится между зоной реакции и зоной твердофазных продуктов (см. рисунок, б, в, зона 3) и по ширине

в несколько раз превосходит зоны 1 и 2. Заметного влияния на линейную скорость распространения волны эта зона не оказывает, но ввиду большого размера и высокой температуры в ней взаимодействуют значительные количества исходных веществ. Выделяющееся в зоне догорания тепло поступает в зону реакции, повышая в ней температуру, поэтому максимальная температура во фронте спутной волны выше, чем во фронте встречной.

Для того чтобы определить, широкой или узкой является зона реакции рассматриваемого процесса, необходимо определить относительную ширину зоны реакции [8]:

$$\Delta = \frac{L}{L_k}, \quad (2)$$

$$L_k = \frac{\bar{\alpha}}{u}, \quad (3)$$

$$\alpha = lu, \quad (4)$$

где Δ — относительная ширина зоны реакции, L — экспериментальная ширина зоны реакции, L_k — расчетная кондуктивная ширина зоны реакции, $\bar{\alpha}$ — средняя температуропроводность твердой фазы, u — скорость распространения волны горения, α — температуропроводность твердой фазы при различной скорости распространения волны горения, l — экспериментальная ширина предпламенной зоны.

Если относительная ширина зоны реакции больше единицы — зона широкая [1, 8]. Во встречной волне изменение величины Δ прямо пропорционально изменению доли SiF_4 в смеси (табл. 1), а в спутной волне изменение относительной ширины зоны реакции обратно пропорционально концентрации газа-реагента (табл. 2). Во встречной волне влияние фильтрационного переноса тепла в зону реакции растет с увеличением содержания SiF_4 ввиду увеличения его содержания в предпламенной зоне, а в спутной волне — падает, так как повышется концентрация тепла в зоне реакции и возрастает роль кондуктив-

Таблица 1

Значения расчетных и экспериментальных параметров встречной волны горения CaH_2 в потоке SiF_4

Параметр	Значение			
Массовая доля газа-реагента в смеси a_0	0.8	0.85	0.9	0.98
Скорость распространения волны горения $u \cdot 10^2, \text{см} \cdot \text{с}^{-1}$	1.15	1.27	1.42	1.80
Температуропроводность твердой фазы при различной скорости распространения волны горения $\alpha \cdot 10^2, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	3.45	3.81	4.26	1.80
Средняя температуропроводность твердой фазы $\bar{\alpha} \cdot 10^2, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	3.33			
Экспериментальная ширина предпламенной зоны $l, \text{см}$	3	3	3	1
Расчетная кондуктивная ширина зоны реакции $L_k, \text{см}$	2.90	2.62	2.35	1.85
Экспериментальная ширина зоны реакции $L, \text{см}$	3	3	3	3
Относительная ширина зоны реакции Δ	1.03	1.15	1.28	1.62

Таблица 2

Значения расчетных и экспериментальных параметров спутной волны горения CaH_2 в потоке SiF_4

Параметр	Значение			
Массовая доля газа-реагента в смеси a_0	0.8	0.85	0.9	0.98
Скорость распространения волны горения $u \cdot 10^2, \text{см} \cdot \text{с}^{-1}$	1.11	1.20	1.22	1.28
Температуропроводность твердой фазы при различной скорости распространения волны горения $\alpha \cdot 10^2, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	8.88	7.20	6.10	3.84
Средняя температуропроводность твердой фазы $\bar{\alpha} \cdot 10^2, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	6.51			
Экспериментальная ширина предпламенной зоны $l, \text{см}$	8	6	5	3
Расчетная кондуктивная ширина зоны реакции $L_k, \text{см}$	5.86	5.43	5.34	5.09
Экспериментальная ширина зоны реакции $L, \text{см}$	12	8	7	6
Относительная ширина зоны реакции Δ	2.05	1.50	1.31	1.18

ного механизма теплопередачи. Следует отметить, что при массовой доле SiF_4 0.8 при распространении встречной волны перенос тепла практически полностью осуществляется за счет теплопроводности исходной твердой фазы, но при распространении спутной волны возрастает роль конвективного переноса тепла, чем и объясняется существенное увеличение ширины зоны реакции в спутной волне относительно встречной. При массовой доле SiF_4 0.98 в потоке газов роль фильтрации в переносе тепла при переходе от встречной волны к спутной уменьшается в результате увеличения теплопотерь в окружающую среду.

Для определения структуры волны горения необходимо определить величину параметра δ [9]:

$$\delta_{\text{вс}} = \frac{\mu_r c_r}{a_0 c_0}, \quad (5)$$

$$\delta_{\text{сп}} = \frac{\mu_r c_r}{a_0 c_{\text{п}} \mu_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где $\delta_{\text{вс}}$, $\delta_{\text{сп}}$ — безразмерные параметры, определяющие структуру встречной и спутной волн соответственно ($\delta > 0$); μ_r , $\mu_{\text{п}}$ — безразмерные стехиометрические коэффициенты расхода газа-реагента и образования конденсированного продукта на 1 г исходного твердого вещества; c_r , c_0 , $c_{\text{п}}$ — удельная теплоемкость исходной газовой смеси, исходного твердого реагента и твердофазных продуктов реакции ($\text{кал} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); a_0 — массовая доля газа-реагента в смеси.

При $0 < \delta < 1$ скорость фильтрационного переноса тепла меньше линейной скорости движения волны горения, и выделившееся тепло скапливается в основном за волной (нормальная структура волны горения), а при $\delta > 1$ скорость фильтрации больше скорости волны, и тепло в основном концентрируется перед волной (инверсная структура волны горения). При $\delta = 1$ выделяющееся при горении тепло полностью концентрируется в зоне реакции [4, 16].

Структура встречной волны соответствует инверсной структуре волны горения, что следует из расчетных значений $\delta_{\text{вс}}$ (табл. 3). На практике широкой предпламенной зоны с температурой, близкой к

максимальной температуре во фронте горения и превышающей по размеру зону реакции, не наблюдается. Не происходит и резкого остывания или закаливания конденсированных продуктов реакции, характерных для процессов горения с инверсной структурой волны. Это связано с тем, что выделяющееся в реакции тепло частично уносится потоком смеси газа-носителя и образовавшегося SiH_4 . Экспериментально наблюдаемая встречная волна по структуре является переходной.

Структура спутной волны как по расчетным, так и по экспериментальным данным соответствует нормальной структуре волны горения.

Согласно расчету, с увеличением доли активного газа в потоке смеси концентрация тепла в зоне догорания и размер этой зоны должны увеличиваться. Однако в опыте такая закономерность не прослеживается (см. рисунок, б, в). Согласование расчетных и экспериментальных данных наблюдается только при повышении массовой доли газа-реагента с 0.8 (см. рисунок, б) до 0.85 (см. рисунок, в). При повышении доли SiF_4 до 0.9 (см. рисунок, в) ширина зоны догорания не изменяется. В том случае, когда массовая доля активного газа в смеси равна 0.98 (см. рисунок, б), увеличивается концентрация тепла в зоне реакции, ширина зоны догорания и предпламенной зоны уменьшается, но заметного роста максимальной температуры во фронте реакции не наблюдается из-за роста теплопотерь в окружающее пространство.

В работе [13] были опубликованы результаты измерения максимальной температуры во фронте реакции и линейной скорости распространения волны горения в диапазоне концентраций SiF_4 0.8–0.98. В соответствии с этими данными для достижения максимально возможного выхода SiH_4 и степени превращения CaH_2 относительная ширина зоны реакции во встречной волне должна быть $\Delta \approx 1$, а в спутной волне — $\Delta \geq 1.5$. При этом структура встречной волны будет стремиться к структуре инверсной волны горения, а спутная волна будет иметь структуру нормальной волны горения.

Таблица 3

Значения параметра δ для встречной и спутной волн горения CaH_2 в потоке смеси $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ с различной массовой долей газа-реагента

Параметр	Массовая доля SiF_4 в смеси с H_2			
	0.8	0.85	0.9	0.98
Безразмерный параметр, определяющий структуру встречной волны, $\delta_{\text{вс}}$	5.57	4.21	2.98	1.32
Безразмерный параметр, определяющий структуру спутной волны, $\delta_{\text{сп}}$	0.21	0.16	0.09	0.05

Выводы

Встречная волна фильтрационного горения CaH_2 в потоке смеси $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ состоит из трех зон: предпламенной зоны, зоны реакции и зоны продуктов реакции. Спутная волна состоит из четырех зон: предпламенной зоны, зоны реакции, зоны догорания и зоны продуктов реакции. Встречная волна имеет структуру переходной волны горения, а спутная волна имеет структуру нормальной волны горения.

При увеличении массовой доли SiF_4 в смеси с водородом в интервале 0.8–0.98 относительная ширина зоны реакции во встречной волне увеличивается от 1.03 до 1.62, а в спутной волне уменьшается от 2.05 до 1.18. Горение CaH_2 в потоке смеси $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ в указанном интервале массовых долей SiF_4 протекает в широких зонах реакции как во встречной, так и в спутной волне.

Финансирование работы

Работа выполнена по Программе НИР госзадания № 0095-2019-0008.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Лашков Артем Юрьевич, к.х.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9927-6263>

Буланов Андрей Дмитриевич, д.х.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5717-0527>

Трошин Олег Юрьевич, к.х.н., доцент,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6996-1561>

Список литературы

- [1] Алдушин А. П., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. О некоторых особенностях горения конденсированных систем с тугоплавкими продуктами реакции // ДАН СССР. 1972. Т. 204. № 5. С.1139–1142.
- [2] Мержанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов. Черноголовка: ИСМАН, 1998. С. 288–301.
- [3] Алдушин А. П., Мержанов А. Г. // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матроса. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9–34.
- [4] Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Инверсия структуры волны горения в пористой среде при продуве газа // ДАН СССР. 1979. Т. 249. № 3. С.585–589.
- [5] Салганский Е. А., Фурсов В. П., Глазов С. В., Салганская М. В., Манелис Г. Б. Модель воздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 1. С.44–50 [Salganskii E. A., Fursov V. P., Glazov S. V., Salganskaya M. V., Manelis G. B. Model of air gasification of a solid fuel in a filtration regime // Combust. Explos. Shock Waves. 2003. V. 39. N 1. P. 37–42. <https://doi.org/10.1023/A:1022193117840>].
- [6] Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. Теория теплового распространения пламени // ЖФХ. 1938. Т. 12. № 1. С.100–105.
- [7] Алдушин А. П., Мартемьянова Т. М., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. Распространение фронта экзотермической реакции в конденсированных смесях при взаимодействии компонентов через слой тугоплавкого продукта // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8. № 2. С. 202–212.
- [8] Зенин А. А., Мержанов А. Г., Нерсисян Г. А. Исследование структуры тепловой волны в СВС-процессах // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 1. С. 79–90.
- [9] Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // ДАН СССР. 1978. Т. 241. № 1. С.72–75.
- [10] Гольдшлегер У. И., Шафирович Е. Я. Режимы горения магния в оксидах углерода. 2. Горение в CO // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 2. С. 67–73 [Gol'dshleger U. I., Shairovich E. Ya. Combustion regimes of magnesium in carbon oxides. 2. Combustion in CO // Combust. Explos. Shock Waves. 2000. V. 36. N 2. P. 220–226. <https://doi.org/10.1007/BF02699364>].
- [11] Буланов А. Д., Михеев В. С., Трошин О. Ю., Лашков А. Ю. Взаимодействие тетрафторида кремния и гидрида кальция в форме распространяющейся волны реакции // ЖНХ. 2008. Т. 53. № 1. С. 11–15 [Bulanov A. D., Mikheev V. S., Troshin O. Yu., Lashkov A. Yu. Reaction of silicon tetrafluoride with calcium hydride as a propagating wave // Russ. J. Inorg. Chem. 2008. V. 53. N 1. P. 6–10. <https://doi.org/10.1134/S0036023608010026>].
- [12] Лашков А. Ю., Буланов А. Д., Трошин О. Ю. Процесс фильтрационного горения тетрафторида кремния и гидрида кальция для получения моносилана // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 9. С.981–984. <https://doi.org/10.7868/S0002337X16090104> [Lashkov A. Yu., Bulanov A. D., Troshin O. Yu. Filtration combustion of silicon tetrafluoride and calcium hydride for the preparation of monosilane // Inorg. Mater. 2016. V. 52. N 9. P. 915–918. <https://doi.org/10.1134/S0020168516090107>].
- [13] Лашков А. Ю., Буланов А. Д., Трошин О. Ю. Зависимость параметров волны горения CaH_2 в SiF_4 от концентрации реагента в потоке газовой смеси // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 2. С. 146–152. <https://doi.org/10.31857/S004446182102002X>

- [Lashkov A. Yu., Bulanov A. D., Troshin O. Yu. An effect of the reagent concentration in the flow of a gas mixture on the parameters of the combustion wave of CaH_2 in SiF_4 // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. N 2. P. 136–142. <https://doi.org/10.1134/S1070427221020026>].
- [14] Буланов А. Д., Пряхин Д. А., Балабанов В. В. Получение высокочистого тетрафторида кремния термическим разложением Na_2SiF_6 // ЖПХ. 2003. Т. 76. № 9. С. 1433–1435 [Bulanov A. D., Pryakhin D. A., Balabanov V. V. Preparation of high-purity silicon tetrafluoride by thermal dissociation Na_2SiF_6 // Russ. J. Appl. Chem. 2003. V. 76. N 9. P. 1393–1395. <https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000012654.22326.e5>].
- [15] Буланов А. Д., Трошин О. Ю., Балабанов В. В. Синтез высокочистого гидрида кальция // ЖПХ. 2004. Т. 77. № 6. С. 887–889 [Bulanov A. D., Troshin O. Yu., Balabanov V. V. Synthesis of high-purity calcium hydride // Russ. J. Appl. Chem. 2004. V. 77. N 6. P. 875–877. <https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000044107.80122.61>].
- [16] Ваганов Д. А., Шатунова Е. Н., Перегудов Н. И., Самойленко Н. Г. Закономерности фильтрационного воспламенения // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 4. С. 44–48 [Vaganov D. A., Shatunova E. N., Peregudov N. I., Samoilenko N. G. Laws of filtration ignition // Combust. Explos. Shock Waves. 2002. V. 38. N 4. P. 417–421. <https://doi.org/10.1023/A:1016203014164>].
-