

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ CaH_2 В SiF_4 ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ РЕАГЕНТА В ПОТОКЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

© 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 3 июля 2020 г.

После доработки 20 октября 2020 г.

Принята к публикации 5 ноября 2020 г.

Исследована зависимость максимальной температуры во фронте реакции, линейной скорости волны горения CaH_2 в смеси газов SiF_4 и H_2 с образованием SiH_4 и степени превращения гидроксида кальция от начальной массовой концентрации тетрафторида кремния. Экспериментальные данные получены в вертикальном проточном реакторе при вынужденной фильтрации газов в интервале массовых долей SiF_4 0.7–0.98. Проведено сравнение результатов эксперимента с данными расчета по классической физико-математической модели распространения волны экзотермической реакции в пористой среде при продувке газа. Установлены сходства и различия экспериментальных и рассчитанных значений максимальной температуры во фронте реакции, линейной скорости распространения волны горения и степени превращения твердофазного реагента.

Ключевые слова: максимальная температура; линейная скорость; степень превращения; массовая доля; вынужденная фильтрация

DOI: 10.31857/S004446182102002X

Под фильтрационным горением понимается распространение волны экзотермического превращения в пористой среде при фильтрации газа [1]. Механизм распространения зоны реакции включает в себя прогрев исходного твердого реагента перед фронтом реакции и локальное химическое взаимодействие с выделением достаточного количества тепла для поддержания горения. Газ в такой системе является участником реакции и теплоносителем, формирующим тепловую структуру волны.

Одним из видов фильтрационного горения является горение с вынужденной фильтрацией [2], которое реализуется при продувке через пористый образец газа с заданным расходом или путем искусственного создания разности давлений на торцах реактора. Существует ряд теоретических [3–6] и экспериментальных [7, 8] работ, посвященных горению с вынужденной фильтрацией. В работах [3, 4] представлена

физико-математическая модель горения газа в пористой среде в адиабатическом проточном реакторе и описаны результаты теоретических исследований при продувке газа с постоянным расходом через пористое твердое тело. Показано, что структура волны горения при встречной и спутной фильтрации различная. В [5] на основе модели, разработанной в [3], исследованы закономерности фильтрационного воспламенения в условиях вынужденной фильтрации. Установлены параметры, которые определяют характер взаимодействия газа с пористым веществом: резкий рост температуры с переходом горения во взрыв или плавный разогрев. Авторы [6] с помощью численных методов показали, что при фильтрационном горении твердых пористых сред могут возникать вихревые течения газа. В [7] экспериментально исследовали горение активного угля БАУ-А (фракция 2–3 мм) в смеси с инертным компонентом в зависимости от концен-

трации кислорода в фильтрующей газовой смеси. Авторы [8] изучали процесс взаимодействия хрома с азотом, разбавленным инертным газом (Ar, He), при различном давлении и расходе азота. Было показано, что вынужденная фильтрация интенсифицирует распространение волны горения в системе Cr–N₂. В работах [9, 10] рассмотрено взаимодействие SiF_4 и CaH_2 с образованием моносилана в вертикальном проточном реакторе, протекающее в фильтрационном режиме. Содержание исходных компонентов газовой смеси — SiF_4 и H_2 в данных работах составляло соответственно 0.8 и 0.2 мас. доли. В [10] для встречной волны определены основные кинетические параметры реакции: константа скорости, порядок реакции и энергия активации. Исследования влияния состава газовой смеси на основные характеристики волны горения: максимальную температуру во фронте волны, линейную скорость распространения и степень превращения гидрида кальция — ранее не проводились.

Результаты исследований не позволяют в полной мере ответить на вопросы о зависимости максимальной температуры во фронте реакции, скорости распространения волны горения и степени превращения твердого реагента от расхода газа и массовой доли в нем активного компонента при проведении процесса фильтрационного горения в неадиабатическом реакторе при неполной конверсии конденсированной фазы.

Цель работы — исследование зависимости максимальной температуры во фронте реакции, скорости распространения волны фильтрационного горения гидрида кальция (CaH_2) в тетрафториде кремния (SiF_4) и степени превращения CaH_2 от массовой доли SiF_4 в газовой смеси при наличии теплопотерь в окружающую среду и неполной конверсии твердофазного реагента.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводили в вертикальном проточном реакторе из нержавеющей стали длиной 120 см и внутренним диаметром 5 см, внутри которого в стальной трубке внешним диаметром 1.4 см, установленной коаксиально, на одинаковом расстоянии друг от друга (~20 см) расположены 6 хромель-копелевых термопар (ТХК) [9]. Реактор, заполненный порошком гидрида кальция (фракция 0.4–0.6 мм, насыпная плотность — 1.3 г·см⁻³), нагревали до 90–110°C, а печь зажигания, установленную в месте расположения пятой термопары, до 150–160°C и снизу реактора пускали поток смеси газов $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$. Состав смеси на входе в реактор задавали при помощи регулятора

расхода газа Bronkhorst High-Tech. Состав газовой смеси на выходе из реактора определяли гравиметрическим методом [9]. Суммарный поток поддерживали на уровне 250–320 мл·мин⁻¹. Массовый расход (SiF_4) составлял 50–57 г·ч⁻¹. Взаимодействие реагентов начиналось после локального инициирования реакции с помощью резистивной печи зажигания, положение которой обеспечивало взаимодействие реагентов последовательно во встречном (волна горения распространяется сверху вниз навстречу потоку газов) и спутном (волна горения движется совместно с потоком газов) потоках газовой смеси. После отключения печи (по достижении максимума температуры на ТХК № 3 во встречной волне) процесс протекал в автоволновом режиме. Газ-реагент полностью расходовался в зоне реакции. После завершения процесса в реакторе оставалась смесь твердофазных продуктов и исходного CaH_2 . Линейную скорость волны горения определяли как расстояние между соседними ТХК, пройденное за временной интервал. Значение максимальной температуры в зоне реакции отображалось на экране монитора персонального компьютера при достижении фронтом реакции спая ТХК. По окончании экспериментов полученные данные заносили в программу OriginPro 7.0, с помощью которой строили термограммы, показывающие изменение температуры внутри реактора в зависимости от времени процесса [9] и зависимости параметров волны горения от концентрации SiF_4 в смеси с водородом.

Обсуждение результатов

При анализе параметров волны горения, полученных в ходе экспериментов, установлено, что ведущую роль в реакции



при отсутствии разбавления твердой фазы конденсированными продуктами играет концентрация газа-реагента в потоке газовой смеси. В наших опытах содержание SiF_4 в потоке (a_0) составляло 0.7, 0.8, 0.85, 0.9, 0.98 мас. доли соответственно.

При анализе зависимости максимальной температуры во фронте горения (T_{max}) от массовой доли SiF_4 в смеси выяснилось, что вид кривой во встречной волне отличается от вида кривой в спутной волне (рис. 1). При протекании реакции во встречной волне максимальная температура во фронте реакции растет с увеличением массовой доли SiF_4 в смеси в связи с интенсификацией тепловыделения в результате реакции. Иная картина наблюдается для зависимости

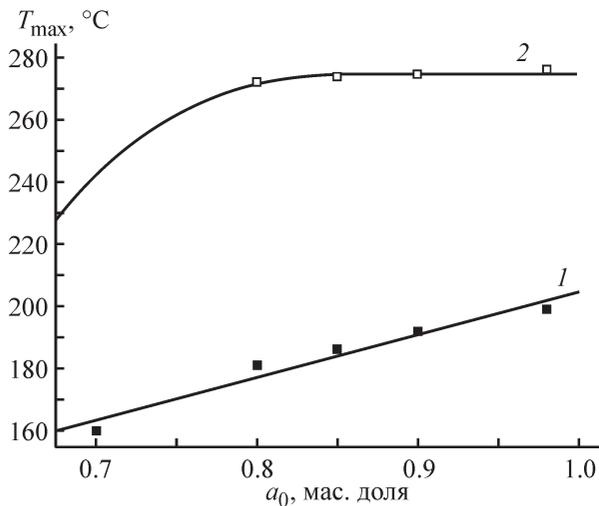


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры во фронте реакции от начальной концентрации SiF_4 в потоке газовой смеси.

1 — во встречной волне, 2 — в спутной волне.

от a_0 максимальной температуры во фронте спутной волны. При изменении массового содержания SiF_4 в смеси с 0.7 до 0.8 T_{\max} растет, однако при дальнейшем увеличении концентрации SiF_4 максимальная температура во фронте горения практически не изменяется. Это связано с усилением влияния кинетического торможения реакции твердофазными продуктами, которое имеет место при горении в спутном потоке газа-реагента [2] и препятствует его проникновению к фронту реакции. Вместе с тем при автоторможении за фронтом реакции формируется зона догорания [2],

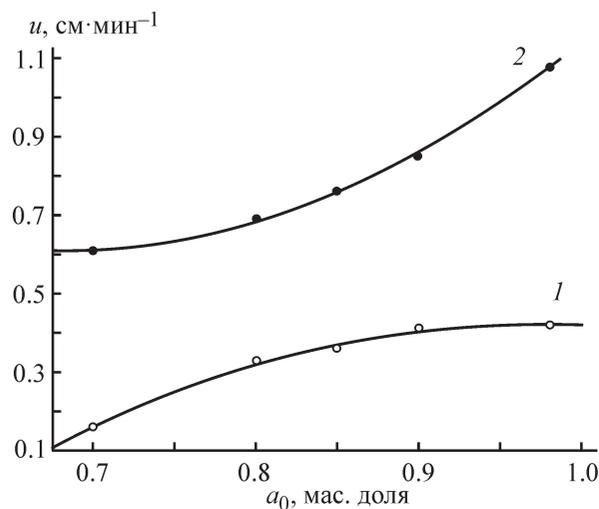


Рис. 2. Зависимость линейной скорости распространения волны горения от начальной концентрации SiF_4 в потоке газовой смеси.

1 — во встречной волне, 2 — в спутной волне.

в которой превращается значительная часть активного газа, а выделяющееся в результате химической реакции тепло конвективно переносится во фронт горения. В результате T_{\max} во фронте спутной волны выше, чем во фронте встречной волны.

С увеличением содержания реагента в потоке (рис. 2) скорость распространения волны горения растет, однако характер зависимостей разный.

Встречная волна горения распространяется по непрореагировавшему гидриду кальция, и ее скорость равна нормальной скорости горения [3]. Ввиду интенсификации тепловыделения при увеличении содержания SiF_4 в потоке газовой смеси наблюдается резкий рост скорости распространения встречной волны. Скорость распространения спутной волны всегда ниже скорости встречной волны, и рост линейной скорости спутной волны не такой интенсивный, как скорости встречной волны, при увеличении массовой доли активного газа по причине автоторможения реакции твердофазными продуктами.

Экспериментальные значения степени превращения CaH_2 [$\eta(\text{CaH}_2)$] определяли согласно [9]. Кривую степени превращения (рис. 3) во встречной волне можно разбить на три участка. В интервале массового содержания SiF_4 0.7–0.8 наблюдается двукратный рост конверсии твердофазного реагента в связи с интенсификацией тепловыделения в результате химической реакции при увеличении массовой доли активного газа в потоке. При содержании SiF_4 0.8–0.85 $\eta(\text{CaH}_2)$ практически не изменяется ввиду незначительного роста максимума температуры и линейной скорости волны. При дальнейшем повышении концентрации газа-реагента происходит резкий рост линейной скорости распространения волны горения (рис. 2), что даже при увеличении T_{\max} (рис. 1) ведет к снижению степени конверсии конденсированной фазы.

В интервале долей SiF_4 0.7–0.8 наблюдается рост зависимости $\eta(\text{CaH}_2)$ в спутной волне от начальной концентрации активного газа. Это происходит из-за автоторможения реакции твердофазными продуктами, которое затрудняет проникновение активного газа в зону реакции, в результате значительная часть SiF_4 сгорает за фронтом реакции, увеличивая конверсию гидрида кальция. При увеличении массовой доли SiF_4 степень конверсии CaH_2 не изменяется, так как достигаемая после прохождения спутной волны суммарная $\eta(\text{CaH}_2) \approx 0.14$ — максимальная для данного процесса и объясняется образованием пленки CaF_2 на поверхности частиц исходного гидрида [11].

Максимум конверсии CaH_2 наблюдается при массовой доле тетрафторида кремния 0.8–0.85 (рис. 3).

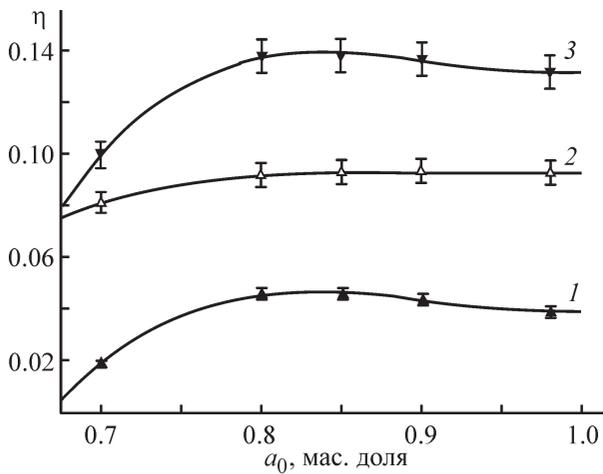


Рис. 3. Зависимость степени превращения CaH_2 от начальной концентрации SiF_4 в потоке газовой смеси. 1 — во встречной волне, 2 — в спутной волне, 3 — общая степень превращения.

При увеличении доли газа-реагента до 0.98 $\eta(\text{CaH}_2)$ снижается ввиду уменьшения степени превращения во встречной волне в этом интервале концентраций SiF_4 .

При синтезе изотопнообогатенных веществ ввиду их высокой стоимости основным технологическим параметром процесса является выход целевого продукта (см. таблицу).

Оптимальное содержание активного газа в потоке для достижения максимальных значений выхода целевого газообразного продукта и конверсии твердофазного реагента — 0.8–0.85. При доле SiF_4 в смеси 0.98 возможен его проскок через зону реакции, о чем говорит значение выхода продукта более 1.

Для сопоставления полученных экспериментальных данных с данными теории фильтрационного горения при вынужденной фильтрации газа через пористую среду была использована модифицированная модель Алдушина–Сеплярского [1, 3]. Данная модель описывает стационарные режимы распространения зоны экзотермического взаимодействия частиц пористой среды с активным компонентом газовой смеси, продуваемой в направлении движения фронта (спутный поток) или против него (встречный поток) в адиабатическом реакторе. Помимо образования

конденсированного продукта в результате химической реакции модель предусматривает выделение газообразного компонента, уносимого потоком, и, как показано в [9], качественно описывает закономерности протекания исследуемого процесса.

Для расчета параметров встречной волны использовали уравнения

$$r_{\text{вс}} = \frac{G_0 a_0}{\rho_0 \mu_r u_{\text{вс}}}, \quad (2)$$

$$T_{\text{вс}} = T_0 + \frac{\eta_{\text{вс}} \frac{q}{c_0}}{(1 + \eta_{\text{вс}} \delta)}, \quad (3)$$

$$u_{\text{вс}} = \frac{G_0 a_0}{\eta_{\text{вс}} \rho_0 \mu_r}, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{вс}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{2RT_{\text{вс}}}{E} \right) \ln r_{\text{вс}}}, \quad (5)$$

для расчета параметров спутной волны

$$r_{\text{сп}} = \frac{G_0 a_0}{\rho_{\text{п}} \mu_r u_{\text{сп}}}, \quad (6)$$

$$T_{\text{сп}} = T_0 + \frac{q \rho_0}{c_{\text{п}} \rho_{\text{п}} - \frac{\mu_r c_r \rho_0}{a_0}}, \quad (7)$$

$$u_{\text{сп}} = \frac{G_0 a_0}{\eta_{\text{сп}} \mu_r \rho_{\text{п}}}, \quad (8)$$

$$\eta_{\text{сп}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{2RT_{\text{сп}}}{E} \right) \ln r_{\text{сп}}}, \quad (9)$$

где $r_{\text{вс}}$, $r_{\text{сп}}$ — безразмерные параметры, разделяющие режимы полного ($r > 1$) и неполного ($r < 1$) превращения твердофазного реагента, $r = 1$ при условии, что активный газ и исходное пористое вещество в зоне реакции реагируют на 100%; G_0 — массовый расход газа-реагента (г); a_0 — массовая доля газа-реагента в смеси; ρ_0 , $\rho_{\text{п}}$ — насыпная плотность исходного твердого реагента и твердофазных продуктов реакции ($\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$); μ_r , $\mu_{\text{п}}$ — стехиометрические коэффициенты расхода газа-реагента и образования конденсированного продукта на 1 г исходного твердого веще-

Выход SiH_4 и степень превращения CaH_2 в зависимости от массовой доли SiF_4 в потоке газовой смеси

Технологический параметр	Массовая доля SiF_4 в потоке газовой смеси a_0				
	0.7	0.8	0.85	0.9	0.98
Выход SiH_4	0.8–0.9	0.93–0.97	0.93–0.97	0.93–0.97	0.97–1.02
$\eta(\text{CaH}_2)$	0.9–0.11	0.136–0.14	0.136–0.14	0.13–0.135	0.13–0.135

ства; $u_{\text{вс}}$, $u_{\text{сп}}$ — линейная скорость волны горения; q — удельный тепловой эффект реакции ($\text{кал}\cdot\text{г}^{-1}$); c_0 — удельная теплоемкость исходного твердого реагента ($\text{кал}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$); δ — безразмерная переменная, определяющая тепловую структуру и параметры волны горения ($\delta > 0$); $c_{\text{г}}$, $c_{\text{п}}$ — удельная теплоемкость газовой смеси и твердофазных продуктов реакции ($\text{кал}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$); $T_{\text{вс}}$, $T_{\text{сп}}$ — максимальная температура во фронте горения ($^{\circ}\text{C}$); T_0 — начальная температура реакции ($^{\circ}\text{C}$); $\eta_{\text{вс}}$, $\eta_{\text{сп}}$, η — степень превращения твердофазного реагента во встречной волне, спутной волне и полная степень превращения; R — универсальная газовая постоянная ($\text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$); E — энергия активации ($\text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}$); индексы «вс» и «сп» соответствуют встречной и спутной волнам горения.

Коэффициенты $\mu_{\text{г}}$ и $\mu_{\text{п}}$ определяются стехиометрическими соотношениями молярных масс соответствующих веществ (1):

$$\mu_{\text{г}} = \frac{M(\text{SiF}_4)}{2M(\text{CaH}_2)}, \quad (10)$$

$$\mu_{\text{п}} = \frac{M(\text{CaF}_2)}{M(\text{CaH}_2)}. \quad (11)$$

Данная модель предполагает, что степень превращения конденсированной фазы в спутной волне равна единице, но в рассматриваемом процессе $\eta(\text{CaH}_2)$ составляет 0.1–0.14, поэтому для учета данного параметра в выражении (8) использовали рассчитанное по экспериментальным данным значение η [9].

Между собой согласуются только экспериментальные и расчетные зависимости $T_{\text{вс}}(a_0)$ (рис. 4, а) и $u_{\text{вс}}(a_0)$ (рис. 5, а), однако на практике линейная скорость встречной волны растет интенсивнее, чем

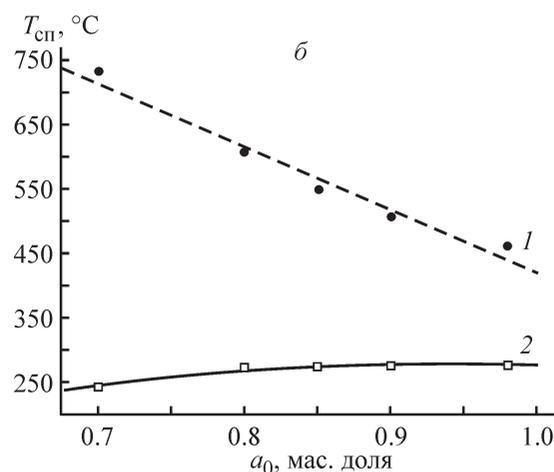
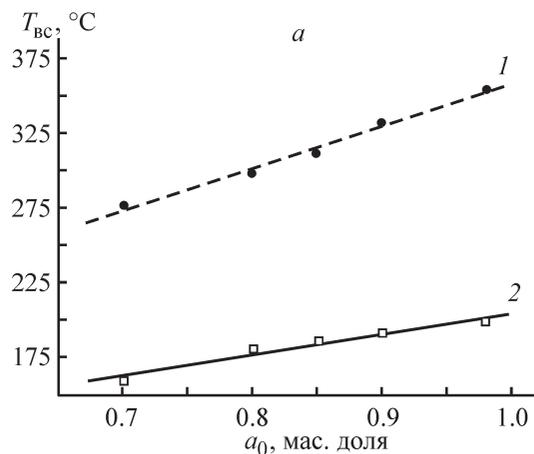


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры во фронте горения от начальной концентрации SiF_4 в потоке газовой смеси.

а — встречная волна, б — спутная волна. 1 — расчет, 2 — эксперимент.

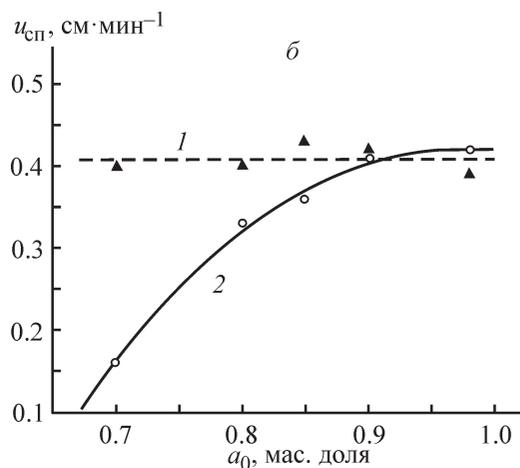
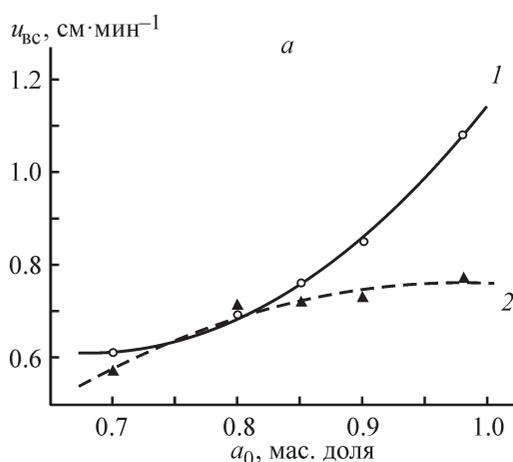


Рис. 5. Зависимость линейной скорости волны горения от начальной концентрации SiF_4 в потоке газовой смеси.

а — встречная волна, б — спутная волна.

1 — расчет, 2 — эксперимент.

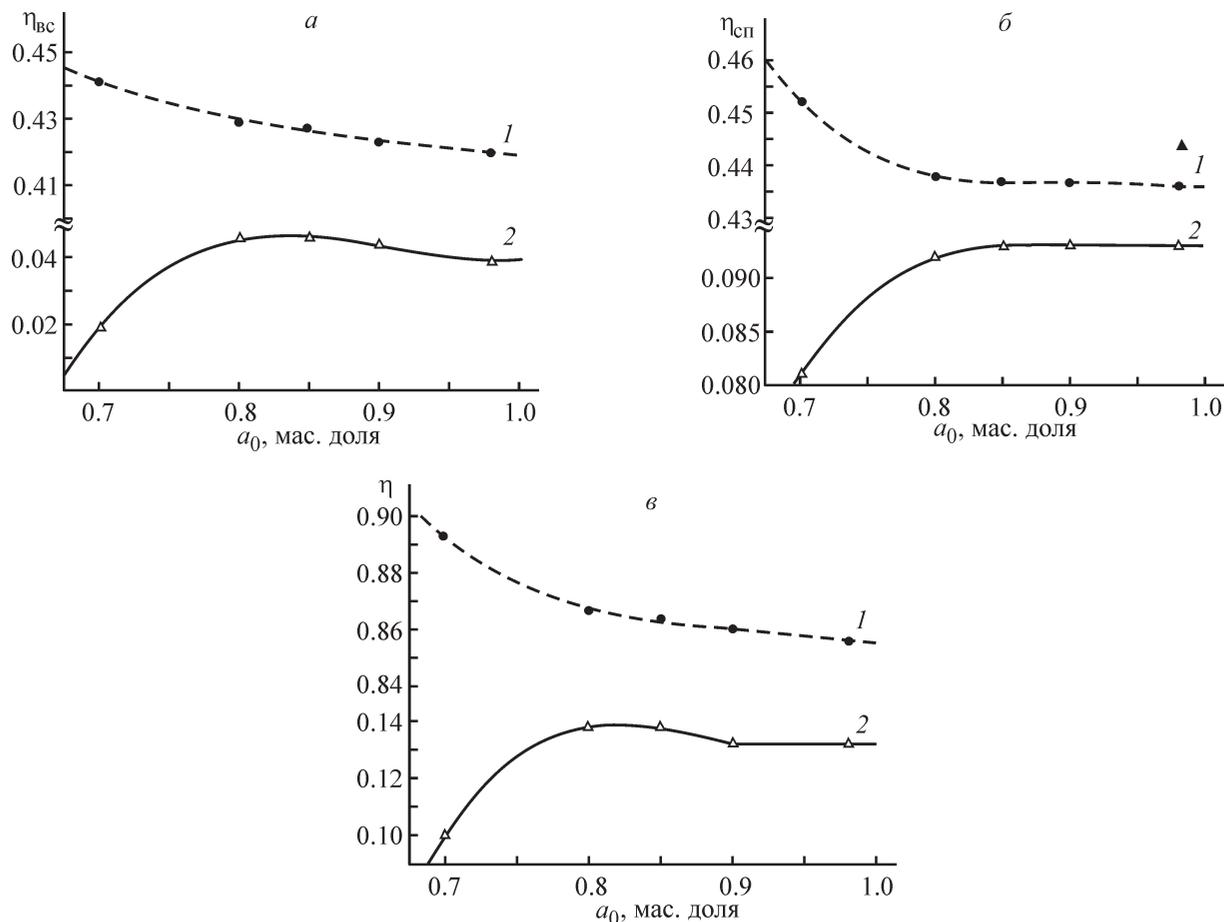


Рис. 6. Зависимость степени превращения от начальной концентрации SiF_4 в потоке газовой смеси.
 а — встречная волна, б — спутная волна, в — общая степень превращения.
 1 — расчет, 2 — эксперимент.

показывает расчет. Это происходит ввиду интенсификации тепловыделения и сильного разогрева прилегающих слоев CaH_2 . В расчетной формуле (4) влияние температуры конденсированной фазы на скорость распространения волны горения не учитывается.

При увеличении массовой доли газа-реагента, согласно выражению (7) [1], уменьшается удельная теплоемкость смеси, так как удельная теплоемкость водорода* значительно выше удельной теплоемкости SiF_4 **. В связи с этим растет количество тепла, уносимого из зоны реакции потоком смеси газа-носителя с газообразными продуктами реакции, и значение T_{max} снижается (рис. 4, б).

При постоянном расходе газовой смеси и незначительном изменении общей степени превращения CaH_2 скорость распространения спутной волны, согласно выражению (8), практически не изменяется.

Согласно расчетам, степень превращения гидрида кальция должна снижаться при увеличении массовой доли активного газа в смеси (рис. 6), но в эксперименте наблюдается иная картина. Рассчитанные значения T_{max} и η сильно завышены относительно экспериментальных, что объясняется неадиабатичностью проточного реактора для получения моносилана, тогда как модель описывает процессы в адиабатической системе.

Выводы

Максимальная температура во фронте реакции и линейная скорость волны горения CaH_2 при вынужденной фильтрации смеси газов SiF_4 и H_2 в интервале массовых долей SiF_4 0.7–0.98 прямо про-

* Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. В 4 т. / Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. Кн. 2. М.: Наука, 1978. С. 31.

** Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. В 4 т. / Под ред. В. П. Глушко. Т. 2. Кн. 2. М.: Наука, 1979. С. 246.

порционально зависят от начальной концентрации газа-реагента. Зависимость параметров во встречной волне сильнее, чем в спутной. Максимальный выход целевого газообразного продукта и максимальная степень превращения конденсированного реагента достигаются при содержании активного газа в потоке смеси 0.8–0.85 мас%.

Для теоретического описания взаимодействия SiF_4 и CaH_2 в вертикальном проточном реакторе необходимо учитывать автоторможение реакции твердофазными продуктами и потери тепла в окружающую среду.

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. // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Магроса. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9–34.
- [2] Мержанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов. Черноголовка: ИСМАН, 1998. С. 288–301.
- [3] 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.
- [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] 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., Satoilenko 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>].
- [6] Левин В. А., Луценко Н. А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твердых пористых сред // ДАН. 2017. Т. 476. № 1. С. 30–34. <https://doi.org/10.7868/S0869565217250077> [Levin V. A., Lutsenko N. A. Two-dimensional gas flows under heterogeneous combustion of solid porous media // Dokl. Phys. 2017. V. 62. N 9. P. 425–429. <https://doi.org/10.1134/S1028335817090014>].
- [7] Кислов В. М., Глазов С. В., Салганский Е. А., Жолудев А. Ф., Салганская М. В. Фильтрационное горение углеродных систем при различном содержании кислорода в газообразном окислителе // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 5. С. 22–26 [Kislov V. M., Glazov S. V., Salgansky E. A., Zholudev A. F., Salganskaya M. V. Filtration combustion of carbon systems with different oxygen contents in a gaseous oxidizer // Combust. Explos. Shock Waves. 2014. V. 50. N 5. P. 518–522. <https://doi.org/10.1134/S0010508214050037>].
- [8] Зиятдинов М. Х. Горение хрома в спутном потоке азота // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 4. С. 51–60. <https://doi.org/10.15372/FGV20160405> [Ziatdinov M. K. Chromium combustion in a nitrogen coflow // Combust. Explos. Shock Waves. 2016. V. 52. N 4. P. 418–426. <https://doi.org/10.1134/S0010508216040055>].
- [9] 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>].
- [10] 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>].
- [11] Трошин О. Ю., Буланов А. Д., Михеев В. С., Лашков А. Ю. Механически активируемый синтез моносилана по реакции гидрида кальция с тетрафторидом кремния // ЖПХ. 2010. Т. 83. № 6. С. 933–937 [Troshin O. Yu., Bulanov A. D., Mikheev V. S., Lashkov A. Yu. Mechanically activated synthesis of monosilane by the reaction of calcium hydride and silicon tetrafluoride // Russ. J. Appl. Chem. 2010. V. 83. N 6. P. 984–988. <https://doi.org/10.1134/S1070427210060108>].