

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ
ГОРЕНИЯ РАЗБАВЛЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ Ti + C
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ВЕЛИЧИНЫ СПУТНОГО ПОТОКА ГАЗА

© 2020 г. Б. С. Сеплярский^{1*}, Р. А. Кочетков¹, Т. Г. Лисина¹, Н. И. Абзалов¹

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
Российской академии наук им. А.Г. Мережанова, Черноголовка, Россия

*E-mail: seplb1@mail.ru

Поступила в редакцию 03.12.2018;
после доработки 03.12.2018;
принята в печать 21.01.2019

В работе исследована зависимость скорости горения гранулированной смеси Ti + C, разбавленной инертными гранулами корунда на 30 и 60%, от величины спутного потока газа. Обнаружено сильное влияние спутных потоков инертного (аргон) и активного (азот) газов на скорость распространения фронта горения. При разбавлении смеси на 60% во всем диапазоне значений расхода газа показано качественное согласие экспериментальных скоростей горения и полуэкспериментальных расчетов, когда к скорости, вычисленной по теории фильтрационного горения, добавляется экспериментально выявленный ее прирост из-за поджатия гранул смеси в процессе горения. При разбавлении смеси на 30% значительное превышение экспериментальных значений скоростей в потоке газа над расчетными указывает на существенную роль внутренних радиационных теплопотерь. При величинах потока азота выше 600–700 л/ч резкое возрастание скорости горения можно связать с его переходом в конвективный режим. Обнаружено, что для смеси, разбавленной корундом на 30%, более низкие прибавки скорости горения в азоте, чем в аргоне, при низких расходах газа связаны с поглощением азота при взаимодействии с титаном.

Ключевые слова: горение, карбид титана, гранулированные смеси, спутный поток газа, теплообмен, режимы горения, перколяция.

DOI: 10.31857/S0207401X20010136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований закономерностей и механизмов горения гранулированных смесей в спутном потоке газа связана с их принципиальным отличием от порошковых смесей (см. работы [1, 2]). Причиной изменения механизма горения является наличие дополнительного уровня в иерархии характерных масштабов смеси – размера гранул [2]. Установлено, что в отсутствие потока газа скорость распространения фронта горения в гранулированных смесях определяется в основном кондуктивной теплопередачей от гранулы к грануле. При наличии спутного потока газа добавляется перенос тепла газовым потоком, что при горении в потоке азота приводит к смене кондуктивного режима распространения на конвективный при перепаде давления меньше 1 атм [3]. Для гранулированной смеси Ti + C при разбавлении ее инертными гранулами Al₂O₃ (особенности горения такой смеси в зависимости от способа разбавления см. в работе [4]) сильное влияние спутного потока газа на скорость распространения фронта горения наблюдалось

и для аргона, и для азота [5] (фиксированный перепад давлений в 1 атм). Измеренные значения скорости фронта заметно превышали рассчитанные по теории фильтрационного горения (ТФГ). Причину такого увеличения в работе [5] выяснить не удалось. При горении гранулированной смеси Ti + C, разбавленной инертными гранулами, согласно термодинамическим расчетам (термодинамические расчеты в настоящей работе проводились с использованием программы THERMO, <http://www.ism.ac.ru/thermo/>) азот должен вести себя как инертный газ, так как не вытесняет углерод из карбида титана. Однако в [5] было показано, что прирост скорости горения в потоке активного газа (азота) превышал прирост в потоке инертного газа (аргона) при всех разбавлениях вплоть до концентрационного предела горения.

Цель данной работы – выяснение механизма сильного влияния величин потока газа на скорость горения разбавленных гранулированных смесей. Также ставилась задача выяснить, при ка-

Таблица 1. Применяемые вещества и реагенты

Вещество	Марка	Размеры частиц	
		до 50 мас.%	до 90 мас.%
Титан	ПТМ	<31 мкм	<63 мкм
Сажа	П-803	<2.5 мкм	<4 мкм
Оксид алюминия		<1.1 мм	<1.3 мм
Спирт этиловый		технический (95%)	
Аргон		1 сорт (99.987%)	
Азот		1 сорт (99.987%)	
Поливинилбутираль		SD-4	

ких перепадах давления на образце спутный поток газа начинает оказывать заметное влияние на скорость горения. Поэтому в настоящей работе проведено изучение закономерностей горения гранулированных смесей Ti + C как при небольших разбавлениях корундом (30%), так и вблизи предела распространения (60%) [5], для разных величин потоков инертного (argon) и активного (азот) газов. Сопоставление скоростей горения в потоках активного и инертного газов позволяет разделить влияние конвективного теплопереноса фильтрующимся газом и химического взаимодействия азота с титаном на скорость горения смеси.

Выбор Al_2O_3 в качестве инертного разбавителя диктовался его высокой температурой плавления (2317 К), которая значительно превышает температуру плавления титана (1933 К). Расчетная адиабатическая температура продуктов горения смесей с массовой долей разбавителя в 30 и 60% составляла 2300 и 1600 К соответственно. Заметим, что при доле разбавителя 30% адиабатическая температура продуктов горения смеси выше температуры плавления титана, а при 60% — ниже, однако выше температуры фазового перехода ($\alpha \rightarrow \beta$) в титане, которая равна 1155 К [6]. Как показано в работах [4, 5], при увеличении концентрации разбавителя более чем на 50%, в продуктах горения появляется свободный титан. Неполное превращение исходной смеси при высоких степенях разбавления является характерным признаком распространения фронта горения по переколяционному кластеру [7, 8], в котором температура горения превышает равновесные адиабатические температуры продуктов, рассчитанные для разбавленных смесей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Используемые в работе исходные вещества и их краткие характеристики приведены в табл. 1. Фракционный состав и распределение частиц по размеру в порошке определяли по стандартной методике на приборе MicroSizer 201.

Гранулирование составов проводилось следующим образом: исходная порошковая смесь Ti + C перемешивалась в течение 5 ч в смесителе типа “пьяная бочка”. Затем к полученной смеси добавляли 4%-ный раствор поливинилбутираля в этиловом техническом спирте. Полученная после смешения пастообразная масса протиралась через сито с размером ячейки 1.25 мм. Для придания полученным частицам сферической формы они окатывались на вращающейся горизонтальной поверхности. Затем частицы высушивались на воздухе в течение 10 ч и рассеивались на вибраторе. В данной работе использовались гранулы с размерами 0.63–1.6 мм. Потом к гранулированной шихте Ti + C добавляли частицы корунда Al_2O_3 и полученную смесь перемешивали вручную в течение 15 мин. Средний размер активных гранул и частиц корунда был около 1.2 мм.

Исследование закономерностей горения выполнялось на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 1. Установка позволяет проводить эксперименты по горению порошковых и гранулированных смесей как в потоке газа, так и без потока с регистрацией параметров газового потока (расход и давление) на входе и выходе из установки. Видеозапись процесса горения проводили с использованием цифровой видеокамеры Sony HDR-PJ330E. Подача газа осуществлялась с верхнего торца образца путем создания избыточного давления необходимой величины. Зависимость среднего объемного расхода газов аргона и азота от их избыточного давления для смесей с разным разбавлением показана на рис. 2. Для исключения усадки исходной гранулированной смеси в процессе горения, вызванной перепадом давлений газового потока, и получения стабильных результатов перед каждым опытом проводилась продувка засыпки потоком аргона при абсолютном давлении на верхнем торце образца, равном 2 атм. Скорость горения определялась на основании покадровой обработки видеозаписей процесса горения.

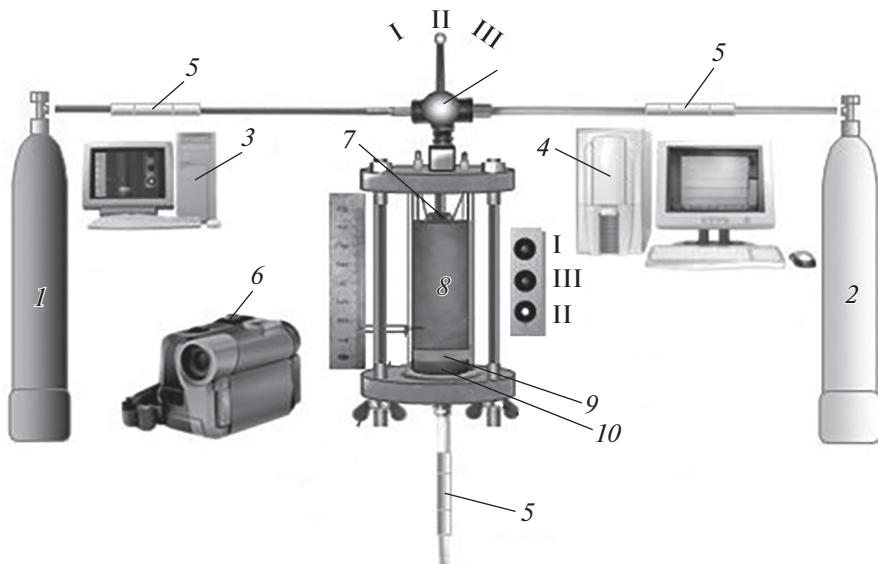


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – баллон с азотом, 2 – баллон с аргоном, 3 – компьютер для записи видеосигнала, 4 – компьютер для записи показаний датчиков через АЦП, 5 – датчики расхода и давления, 6 – цифровая видеокамера, 7 – электрическая спираль, 8 – кварцевая трубка с шихтой, 9 – слой минеральной ваты, 10 – металлическая сетка, 11 – переключатель газа (положение I – азот, II – аргон, III – подача газа перекрыта).

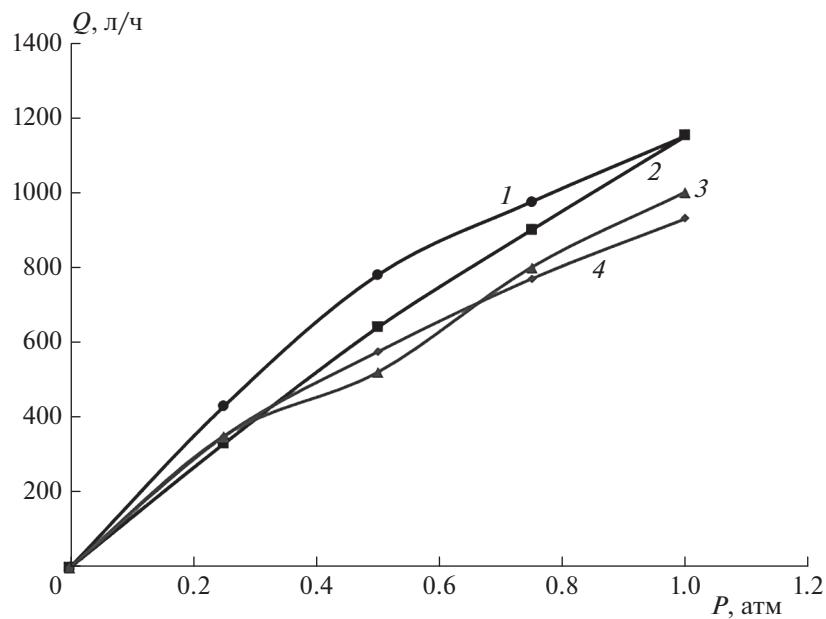


Рис. 2. Зависимость объемного расхода газов от их избыточного давления газа на верхнем торце образца: 1 – поток азота, разбавление смеси на 30%; 2 – поток азота, разбавление смеси на 60%, 3 – поток аргона, разбавление смеси на 60%, 4 – аргон, разбавление смеси на 30%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные зависимости средних значений скорости горения гранулированных смесей Ti + C, разбавленных корундом на 30 и 60%, от величины потока аргона приведены на рис. 3 (кривые 1, 4). Разброс экспериментальных данных не превышает 10%.

Как видно из рис. 3, во всем диапазоне изменения величины потока аргона скорость фронта возрастает. В соответствии с теорией фильтрационного горения выражение для скорости фронта u_f в спутном потоке газа можно представить в виде [9]

$$u_f = u_0 + c_g G_m / c_s \rho_s = u_0 + c_g \rho_g Q / s c_s \rho_s. \quad (1)$$

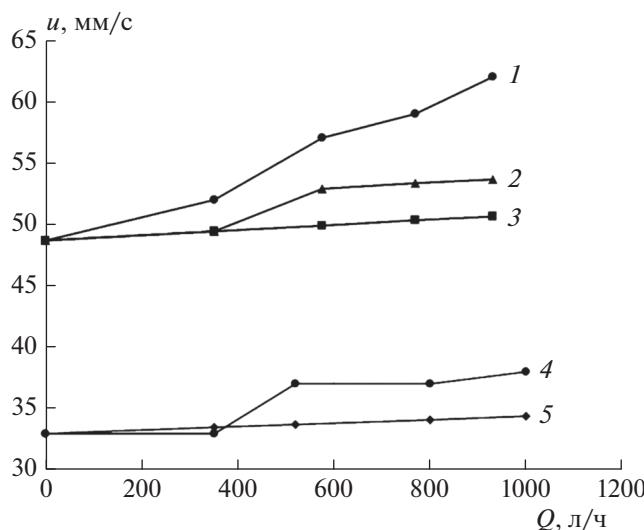


Рис. 3. Зависимость скорости горения разбавленных гранулированных смесей $Ti + C + xAl_2O_3$ от величины объемного потока аргона. Разбавление на 30%: 1 – эксперимент, 2 – расчет по ТФГ + прибавка за счет поджатия гранул, 3 – расчет по ТФГ. Разбавление на 60%: 4 – эксперимент, 5 – расчет по ТФГ.

Здесь u_0 – скорость горения, измеренная в отсутствие потока газа; $G_m = \rho_g Q/s$ – удельный массовый поток втекающего газа при объемном расходе Q через сечение образца s ; ρ_g – плотность газа; c_g – удельная теплоемкость втекающего газа; c_s – удельная теплоемкость пористого вещества; ρ_s – насыпная плотность смеси. Приведенные ниже результаты вычислений дают верхнюю оценку для прироста скорости горения в потоке, так как при расчетах использовались значения теплоемкости смеси и газа при комнатной температуре, а с ростом температуры теплоемкость возрастает. При расчете прироста скорости горения смесей учитывалось изменение теплоемкости смеси при увеличении массовой доли разбавителя y :

$$c_s = [(1-y)c_{s(Ti+C)} + yc_{s(Al_2O_3)}], \quad y = 0.3 \text{ и } 0.6, \quad (2)$$

где теплоемкость активной смеси $c_{s(Ti+C)} = 560 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, а удельная теплоемкость корунда $c_{s(Al_2O_3)} = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Измеренные значения насыпной плотности смеси составляли $\rho_s = 890 \text{ кг}/\text{м}^3$ для содержания корунда 30% и $\rho_s = 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$ для содержания корунда 60%. Для потока аргона $c_g = 520 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\rho_g = 1.78 \text{ кг}/\text{м}^3$, а площадь $s = 2 \text{ см}^2$. На рис. 3 кривая 3 представляет собой результат расчета по формулам (1), (2) для смеси $Ti + C$ с разбавлением на 30%, а кривая 5 – с разбавлением на 60%.

Сравнение значений прироста скорости горения за счет потока аргона, полученных экспериментальным путем и рассчитанных по формулам

(1), (2), показывает, что увеличение скорости горения в потоке аргона превышает оценки по ТФГ для смеси с разбавлением на 30%. Для смеси с разбавлением на 60% экспериментально полученные значения скорости горения в области величин потока аргона ниже 400 л/ч хорошо совпадали с расчетными, а области выше 400 л/ч – превышали расчет по ТФГ примерно на 3 мм/с. Поскольку при расходах аргона выше 400 л/ч прирост скорости горения перестает зависеть от расхода газа, мы предположили, что под действием перепада давления гранулы плотнее прижимаются друг к другу. Поджатие гранул приводит к более быстрому прогреву еще не горевшего слоя гранул, а значит, к увеличению скорости горения гранулированной смеси в потоке газа. Прирост скорости из-за поджатия аргоном вычислялся как разность значений экспериментальной и расчетной кривых для смеси с разбавлением на 60% для каждого значения расхода газа.

Проверим, как повлияет учет прироста скорости за счет поджатия на соответствие расчетной и экспериментальной зависимостей для смеси с разбавлением на 30%. Кривая 2 на рис. 3 получена как сумма расчетной скорости по ТФГ и прироста скорости из-за поджатия гранул, определенного выше. Видно, что эта кривая не описывает экспериментальную зависимость скорости горения смеси с разбавлением на 30%. Уже при величине потока 350 л/ч прибавка скорости фронта составляет примерно 3.3 мм/с против расчетного значения в 0.7 мм/с и достигает 13.3 мм/с при 930 л/ч (против 4.9 мм/с по расчету). В работе [3] при исследовании влияния потока аргона на закономерности горения гранулированных смесей $Ti + xC$ ($x = 0.5, 0.75, 1$) было показано, что при величинах потока аргона 650–730 л/ч скорость горения увеличивается всего на 1–6 мм/с. Следовательно, для смеси $Ti + C$, разбавленной корундом на 30%, влияние спутного потока аргона на скорость горения оказалось гораздо более сильным, чем для однородных гранулированных смесей $Ti + xC$.

Так же, как и в работе [3], мы ожидали увидеть сильное влияние спутного потока азота на горение разбавленных гранулированных смесей $Ti + C$. На рис. 4 приведены зависимости скорости горения от величины потока азота для гранулированных смесей $Ti + C$ при разбавлении частицами корунда на 30% и 60% (кривые 1 и 3 соответственно). Расчет по формулам (1), (2) дает для этих разбавлений линейные зависимости от величины потока (рис. 4, кривые 2 и 4), хорошо совпадающие с экспериментальными кривыми для потоков азота величиной до 330–430 л/ч, что свидетельствует о кондуктивном режиме горения в этой области. В области больших величин потоков азота прирост скорости не описывается ТФГ и при 1000 л/ч достигает 27% и 43% к скорости без потока для разбавления на 60% и 30%, соответственно, тогда как расче-

ты по ТФГ дают прирост примерно в 8% при этих разбавлениях. В этих расчетах при оценке скорости горения использовались значения теплофизических характеристик азота $c_g = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho_g = 1.25 \text{ кг}/\text{м}^3$ при нормальных условиях.

Проверим, повлияет ли учет поджатия гранул, определенного выше, на соответствие расчетной и экспериментальной зависимостей в потоке азота. Для корректного учета прироста скорости в результате "эффекта поджатия", выявленного в аргоне, экспериментальные и расчетные кривые скорости горения смеси в азоте построены в зависимости от массового потока газа (рис. 5). Кривая 2 на рис. 5 получена в результате расчета по ТФГ (формулы (1), (2)) для смеси с разбавлением на 30% с учетом "эффекта поджатия". Видно, что поведение расчетной кривой 2 при больших потоках резко отличается от поведения экспериментальной зависимости (кривая 1 на рис. 5). Аналогичный расчет для смеси с разбавлением на 60% (кривая 4 на рис. 5) показывает соответствие с экспериментом (кривая 3). Обнаруженное совпадение расчетной и экспериментальной зависимостей для смеси с разбавлением на 60% может служить доказательством того, что при горении этой смеси, как и в потоке аргона, основной вклад в увеличение скорости горения во всем диапазоне расходов азота вносит конвективный теплоперенос с учетом "эффекта поджатия".

Для объяснения причины возникновения наблюдавшегося прироста скорости горения прежде всего сравним влияние разбавления гранулированных смесей с влиянием разбавления инертными частицами различных размеров (при степени разбавления 30%) порошковых смесей Ti + C [10] на скорость горения. В работе [10] было показано, что при увеличении размера частиц разбавителя скорость горения возрастает и для частиц размером больше 0.8 мм становится равной скорости горения неразбавленной смеси. Для гранулированных смесей наличие инертных частиц большего размера (1.2 мм) при той же степени разбавления приводит к уменьшению скорости горения. Причина различного влияния состоит в том, что для порошковых смесей лучистый теплообмен не играет заметной роли в передаче тепла в волне горения, а для гранулированных смесей его роль существенна [3], что приводит к потерям тепла на нагрев инертных гранул. В разбавленной гранулированной смеси распространение фронта горения происходит по той части засыпки, которая занята активными гранулами, т.е. по переключационному кластеру [4, 5].

Для оценки вклада внутренних лучистых теплопотерь на нагрев инертных гранул поступали следующим образом. Предполагали, что изменение скорости горения происходит за счет уменьшения температуры горения в области с активны-

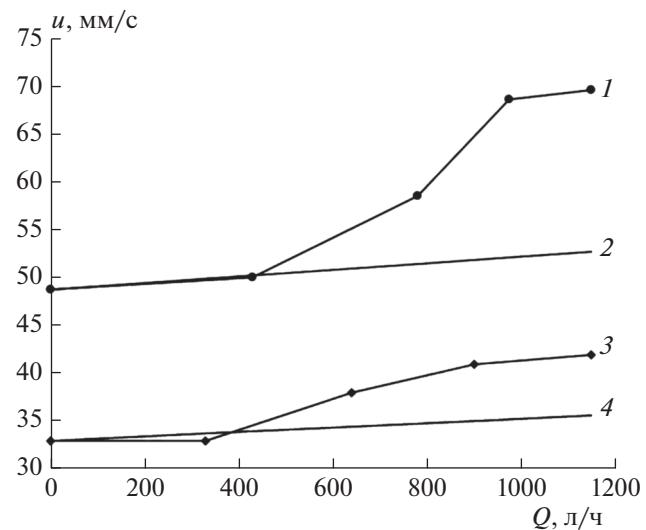


Рис. 4. Зависимость скорости горения разбавленных гранулированных смесей $\text{Ti} + \text{C} + x\text{Al}_2\text{O}_3$ от величины объемного потока азота. Разбавление на 30%: 1 — эксперимент, 2 — расчет по ТФГ. Разбавление на 60%: 3 — эксперимент, 4 — расчет по ТФГ.

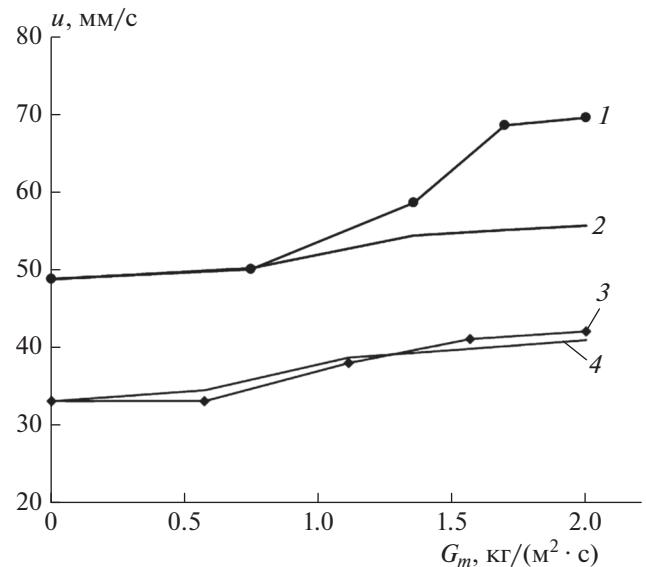


Рис. 5. Зависимость скорости горения разбавленных гранулированных смесей $\text{Ti} + \text{C} + x\text{Al}_2\text{O}_3$ от величины массового потока азота. Разбавление на 30%: 1 — эксперимент, 2 — расчет по ТФГ + прибавка за счет поджатия гранул. Разбавление на 60%: 3 — эксперимент, 4 — расчет по ТФГ + прибавка за счет поджатия гранул.

ми гранулами. Считали, что и в однородной гранулированной смеси $\text{Ti} + \text{C} + x\text{Al}_2\text{O}_3$ (изготовленной из разбавленной порошковой смеси, разбавитель — порошок Al_2O_3 [4]) уменьшение скорости горения происходит за счет снижения температуры. Тогда равные скорости распространения в однородной смеси и в исследуемой смеси в области, занятой

активными гранулами, соответствуют одинаковым температурам горения. Для гранулированной смеси, разбавленной инертными гранулами на 30%, скорость горения без потока равна 49 мм/с. Такая скорость горения соответствует скорости горения однородной гранулированной смеси при разбавлении порошком на 7.5% [4]. Для гранулированной смеси, разбавленной инертными гранулами на 60%, скорость горения без потока равна 33 мм/с. Такая скорость горения соответствует скорости горения однородной гранулированной смеси при разбавлении порошком на 14% [4]. Согласно термодинамическим расчетам, разбавлениям однородной смеси на 7.5% и 14% соответствуют температуры горения 3140 и 2850 К. Следовательно, для смеси, разбавленной гранулами корунда, температура горения в области, занятой активными гранулами, намного превышает расчетную равновесную температуру горения, которая составляет 2300 и 1600 К для смесей с разбавлением на 30% и 60%, соответственно, но ниже температуры горения неразбавленной смеси Ti + C (3300 К).

Ранее было показано [11], что для гранулированных смесей Ti + x C отношение скоростей горения смесей с разным разбавлением пропорционально отношению величин лучистых тепловых потоков, т.е. отношению температур горения в четвертой степени. Проведем аналогичные расчеты для смесей с разбавлением на 30% и 60%. Для смеси с разбавлением на 30% скорость горения равна 49 мм/с, для смеси с разбавлением на 60% – 33 мм/с, отношение скоростей равно 1.48. Отношение температур горения в четвертой степени (3140/2850)⁴ при различном разбавлении смесей равно 1.47. Эти оценки показывают существенный вклад лучистого теплообмена в механизм распространения волны горения в разбавленных смесях.

В соответствии с представлениями теории горения влияние теплопотерь на температуру горения обратно пропорционально квадрату скорости горения. Следовательно, увеличение скорости горения за счет спутного потока газа приводит к уменьшению теплопотерь, вследствие чего происходит рост температуры и дополнительное увеличение скорости горения. Поэтому для гранулированной смеси, разбавленной на 30%, сильное увеличение скорости фронта за счет потока фильтрующегося газа по сравнению с неразбавленными смесями, скорее всего, вызвано уменьшением влияния внутренних теплопотерь. Подчеркнем, что речь идет о приросте скорости, в то время как абсолютная величина скорости даже при максимальных величинах потока имеет в разбавленных смесях более низкие значения. Другим возможным механизмом увеличения скорости горения при больших потоках азота является переход из кондуктивного режима горения в конвективный, описанный в работе [3]. Конвективным режимом

в [3], в отличие от работы [12], назван такой процесс горения, в котором поток активного газа поджигает с поверхности гранулы, обеспечивая более высокую скорость фронта горения, чем полученную в потоке инертного газа и в теоретических оценках по ТФГ. Переход в конвективный режим способствует как высокий коэффициент теплообмена газа с активными гранулами (из-за шероховатости поверхности гранул Ti + C), так и относительно низкая температура начала реакции титана с азотом (1155 К), которая равна температуре фазового перехода ($\alpha \rightarrow \beta$) в титане [6]. Из-за неровности поверхности возможно локальное повышение коэффициента теплообмена [13, 14]. При этом поток горячего газа вызывает быстрый прогрев поверхностного слоя и зажигание гранулы, что и приводит к увеличению скорости распространения фронта.

Разница во влиянии потока газа на горение смесей с разбавлением на 30 и 60% связана с разной структурой смесей (см. рис. 6). Если для смеси с разбавлением на 30% можно найти практически прямолинейный кластер активных гранул (см. рис. 6a), то для разбавления на 60% прохождение волны горения затруднено наличием большого количества инертных гранул, следствием которого является искривление кластера активных гранул (см. рис. 6b). На основании результатов работы [5] мы предполагали, что в спутном потоке инертного газа при высокой степени разбавления инертным материалом скорость распространения пламени практически не изменится. Что касается потока активного газа, то, с одной стороны, азот поджигает с поверхности гранулы, обеспечивая более высокую скорость горения, чем в потоке инертного газа. С другой стороны, скорость распространения фронта может падать из-за понижения температуры фильтрующегося азота вследствие прогрева инертного материала смеси. Таким образом, предсказать, какой из указанных факторов окажет решающее влияние на поведение системы, в которой без потока реализуется перколяционный механизм распространения, было невозможно. Эксперимент показал, что эти факторы компенсируют влияние друг друга, поэтому для аргона и азота влияние спутного потока газа на смесь с разбавлением на 60% оказалось практически одинаковым.

Отметим, что для смеси, разбавленной на 30%, скорость горения в азоте при низких значениях потока газа ниже, чем в аргоне (52 мм/с при $Q = 350$ л/ч в аргоне и 50 мм/с при $Q = 430$ л/ч в азоте), что связано, по-видимому, с поглощением азота при его взаимодействии с титаном [3]. При дальнейшем увеличении потока газа влияние поглощения азота на процесс горения ослабевает и более низкая температура начала взаимодействия титана с азотом обеспечивает более высокую скорость горения смеси в азоте, чем в аргоне. Допол-

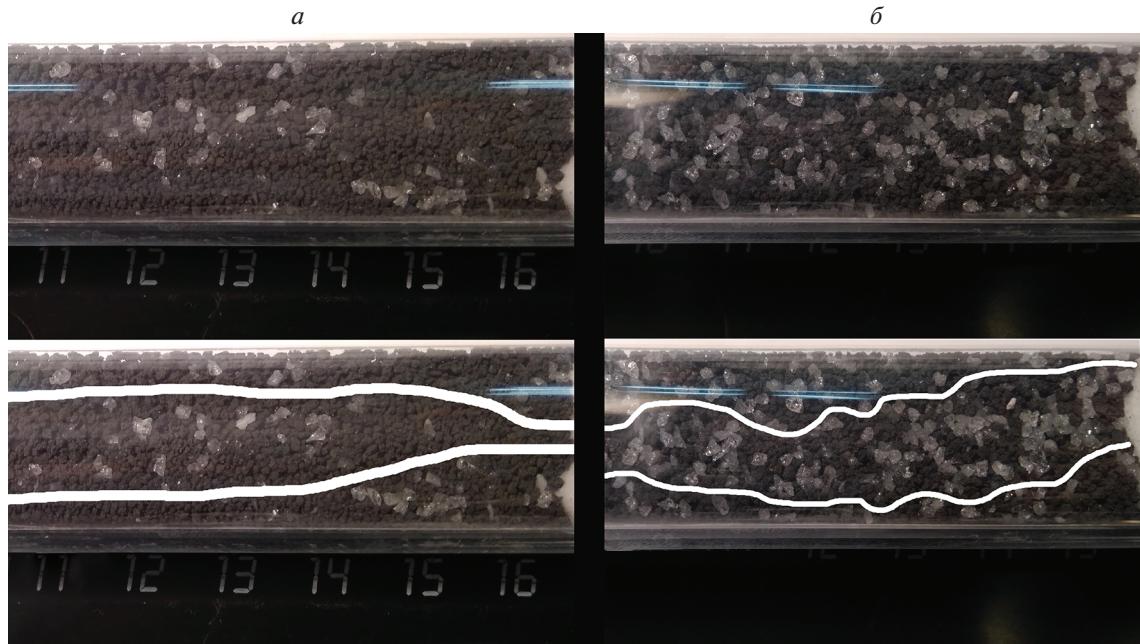


Рис. 6. Продольное сечение образцов смеси с разбавлением на 30 (а) и 60% (б). Темные частицы – гранулы Ti + C, светлые – частицы корунда.

нительным подтверждением влияния поглощения азота титаном на скорость горения является следующий факт: в смеси с разбавлением на 30% отклонение экспериментальных значений скорости горения от результатов расчетов по формулам (1), (2) начинается при более высоких значениях потока, чем для смеси с разбавлением на 60%, из-за большего содержания титана в смеси.

Таким образом, предложены механизмы, объясняющие сильное влияние потока газа на скорость горения разбавленных гранулированных смесей по сравнению с неразбавленными и определены параметрические области такого влияния.

ВЫВОДЫ

- Определены области величин потока газа, для которых экспериментально получены приrostы скорости горения, в несколько раз превышающие рассчитанные по теории фильтрационного горения и для аргона, и для азота.

- При разных значениях расхода газа показан сильный прирост скорости распространения фронта горения в гранулированной смеси $Ti + C + xAl_2O_3$, превышающий прирост скорости для неразбавленной смеси.

- Показано, что увеличение скорости горения в спутном потоке азота и аргона при разбавлении активной смеси на 60% описывается теорией фильтрационного горения с добавлением эффекта поджатия гранул смеси потоком газа.

- Показано, что разница во влиянии потока газа на скорость горения при разбавлении смеси на 30% и 60% связана с изменением формы переколяционного кластера из активных гранул смеси.

- Положительная обратная связь между увеличением температуры горения и ростом скорости фронта горения, обусловленная уменьшением внутренних лучистых теплопотерь при увеличении потока газа, объясняет сильный рост скорости горения в смеси с разбавлением на 30%.

- Оценка температуры во фронте горения в области, занятой активными частицами, для смесей с разбавлением на 30% и 60% дала значения температур горения выше термодинамических равновесных значений.

- Показано, что при низких значениях расхода газа прирост скорости для смеси, разбавленной на 30%, в азоте ниже, чем в аргоне, что объясняется поглощением азота при его взаимодействии с титаном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г., Мукасъян А.С. Твердопламенное горение. М.: Торус Пресс, 2007.
2. Сеплярский Б.С., Тарасов А.Г., Кочетков Р.А. // Физика горения и взрыва. 2013. № 5. С. 55.
3. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 9. С. 23; <https://doi.org/10.7868/S0207401X17090126>
4. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Ковалев И.Д., Лисина Т.Г. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 6. С. 55.

5. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Лисина Т.Г. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 9. С. 25.
6. Carole D., Fréty N., Etienne-Calas S., Merlet C., Marin-Ayral R.-M. // Original Research Article Materials Science and Engineering: A. 2006. V. 419. Issue 1–2. P. 365.
7. Гринчук П.С., Рабинович О.С. // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 4. С. 41.
8. Grinchuk P.S. // JEPTEP. 2013. V. 86. № 4. P. 875.
9. Алдущин А.П., Мержанов А.Г. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988.
10. Маслов В.М., Воюев С.И., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. // Физика горения и взрыва. 1990. № 4. С. 74.
11. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Вадченко С.Г. // Там же. 2016. Т. 52. № 6. С. 51; <https://doi.org/10.15372/FGV20160606>
12. Алдущин А.П. // Физика горения и взрыва. 1990. № 2. С. 60.
13. Матрос Ю.Ш. Нестационарные процессы в катализитических реакторах Новосибирск: Наука, 1982.
14. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983.