

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ СЛОЯ ПОРОШКА МЕТАЛЛА ПРИ НАЛИЧИИ ПРИМЕСНЫХ ГАЗОВ.

П.М. Кришеник, С.В. Костин, С.А. Рогачев, К.Г. Шкадинский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
[pert@ism.ac.ru](mailto:pert@ism.ac.ru)

Предложена нестационарная математическая модель и экспериментальный метод для изучения процессов фильтрационного горения пористых сред с конденсированными продуктами реакций. Проведено исследование влияния отвода инертных и примесных газов в процессе горения из пористой среды на волновые характеристики и устойчивость волновых процессов. Показано, что гетерогенное горение вблизи критических условий его существования при ограничении подвода газообразного реагента в зону реакции при воздействии гравитационных сил сопровождается перестройкой плоского однородного фронта в более сложные волновые структуры: ячеистые, неоднородные. Особенностью исследуемого процесса является наличие газообразных примесей, которые влияют на газообмен в зоне реакции, фильтрационный транспорт газа в высокотемпературную зону, устойчивость фронта, критические условия горения.

В [1-4] разработаны многомерные математические модели, с помощью которых исследованы нестационарные неоднородные волновые структуры. Теоретический анализ подтвердил гипотезу, что в условиях неустойчивости плоского фронта горения пористых высокоэнергетических систем с конденсированными продуктами горения и недостатка активного газа в зоне реакции фронт “распадается” на отдельные ячейки самоподдерживающегося химического превращения. С помощью численных и экспериментальных методов в [4-7] обнаружен автоколебательный характер распространения ячеистых режимов горения. Из анализа фильтрационных режимов горения гетерогенных систем с помощью многомерных математических моделей следовало, что ячеистые режимы горения формируются в пористых средах, где давление газа в процессе горения меняется незначительно. Для приближенного аналитического и численного анализа процессов структурированности фронта в квазиизобарических условиях переноса газа, в [8] были изложены общие математические подходы анализа горения пористых составов. В данной работе предложена одномерная нестационарная математическая модель для исследования

горения пористых сред в многокомпонентном газе. Основное внимание уделено анализу влияния отвода инертных и примесных газов из зоны реакции и продуктов на волновые режимы горения пористых сред.

Для экспериментального анализа формирования неоднородных ячеистых структур исследовалось горение слоя порошка титана в воздушной среде. Использовались металлические кюветы длиной 120 мм и 320 мм, шириной 64 мм с высотой бортиков 7 мм. На дно кюветы насыпался порошок титана ПТС-1 (размер частиц менее 200 мкм) слоем толщиной 4 мм и плотностью 1,6 г/см<sup>3</sup>. Массовое содержание водорода в исходном порошке 0,3%. Сверху кювета прикрывалась полированным кварцевым стеклом длиной 100 мм или 300 мм (в зависимости от размера кюветы), опиравшимся на шлифованные бортики. Воздушный зазор между поверхностью слоя порошка и кварцевым стеклом составлял 3 мм и являлся околоскритическим: при его дальнейшем уменьшении горение слоя прекращалось сразу после инициирования. В торцевых частях образца оставляли щели, т.е. вблизи торцов кювета могла остаться открытой. Газ извне фильтровался вдоль щели между поверхностью слоя порошка титана и кварцевого стекла. Таким образом высота щели являлась важным параметром, с помощью которой регулировался фильтрационный перенос в зону реакции.

При горении пористых составов в потоке многокомпонентного газа, инертный газ аккумулируется в зоне продуктов и реакции, что приводит к изменению фильтрации газа в зону реакции и на режимы горения слоя. Из численного анализа горения таких систем получена зависимость автоколебательных характеристик распространения неустойчивого режима горения от концентрации инертного газа. Исследована зависимость границы устойчивости фронта горения от концентрации инертного газа в исходной газовой смеси, установлено критическое значение концентрации инертной компоненты в исходной смеси  $c_{ин}^*$ . При докритических значениях концентрации реализуется режим полного выгорания, при сверхкритических значениях  $c_{ин}$ , режим неполного выгорания. Показано, что в параметрической области неполного превращения конденсированной компоненты с ростом концентрации инертного газа  $c_{ин}$ , уменьшается массовый поток газа извне, скорость распространения фронта (см.рис.1а), максимальная температура в зоне реакции. Отвод газа из высокотемпературной зоны продуктов и реакции приводит к увеличению критического значения  $c_{ин}^*$  (рис.1б).

Для экспериментального исследования влияния отвода примесных газов на режимы горения пористых сред использовался слой порошка титана в наклонном канале. В этом случае в процессе распространения горения возникают свободно конвективные течения газа обусловленных действием гравитационных сил, которые согласно теоретическому анализу, должны оказать влияние на устойчивость фильтрационного фронта, критические условия существования горения, формирования и распространения ячеистого фронта.

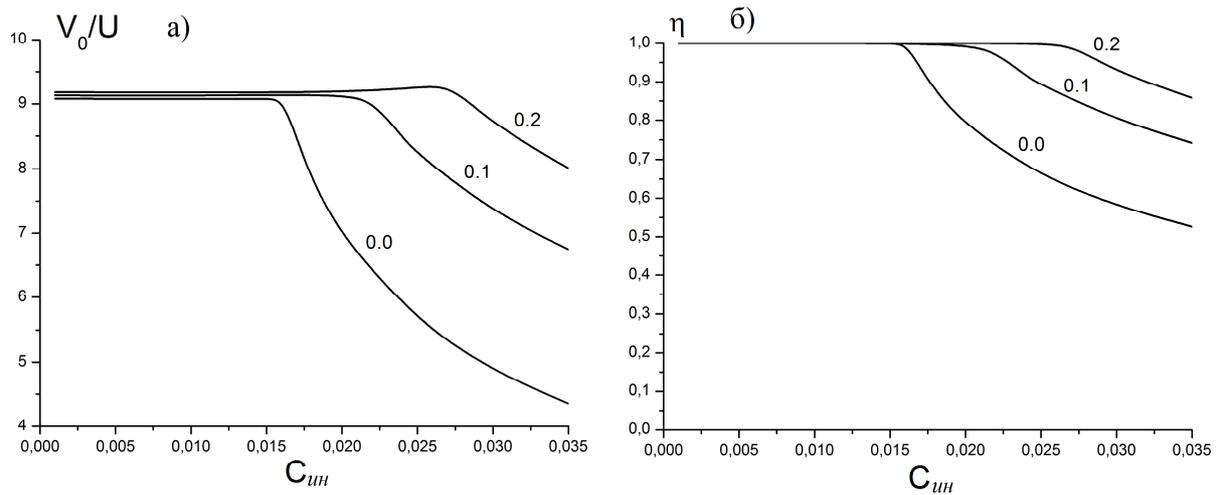


Рис.1. Зависимость характеристик горения пористой среды от начальной концентрации газа в исходной смеси и скорости отвода газа из зоны продуктов,  $\beta = 0.33$ ,  $\gamma = 0.53$ ,  $\theta_0 = -2.8$ ,  $\nu = 0.1$ ,  $\pi = 0.5$ .

В предлагаемой экспериментальной модельной системе в зависимости от организации направления распространения горения в наклонном сквозном канале: сверху вниз или снизу вверх, - силы конвекции действовали, соответственно, встречно или спутно с направлением распространения горения. По мере продвижения зоны горения в наклонном канале возможно изменение силы конвекции с изменением температуры, состава и степени заполнения горячей газовой смесью ограниченного пространства канала и удалённостью зоны экзотермической реакции от верхнего открытого конца канала. Основной акцент сделан на исследование эффекта влияния гравитационных сил и соответственно скорость отвода примесных газов на процесс горения слоя порошка титана в наклонном металлическом сквозном канале в условиях регулируемого фильтрационного транспорта. При движении фронта снизу-вверх порошок зажигается спиралью, приведенной в контакт с открытой частью поверхности у нижнего конца. Уменьшение влияния гравитационных сил по мере движения фронта вверх, формирование развитой тяги приводит к изменению

фильтрационных потоков в процессе горения. Это отражается на количестве и составе газа, который фильтруется в зону реакции, а соответственно на процессы экзотермического превращения конденсированной фазы. При горении порошка титана в сквозном воздушном канале снизу вверх можно выделить несколько этапов волнового превращения пористого слоя металла, которые обладают своими характерными особенностями. Фотографии на рис.2 иллюстрируют процесс горения слоя титана толщиной 4 мм при высоте воздушного зазора над поверхностью слоя 3мм в сквозном плоском канале длиной 100 мм.

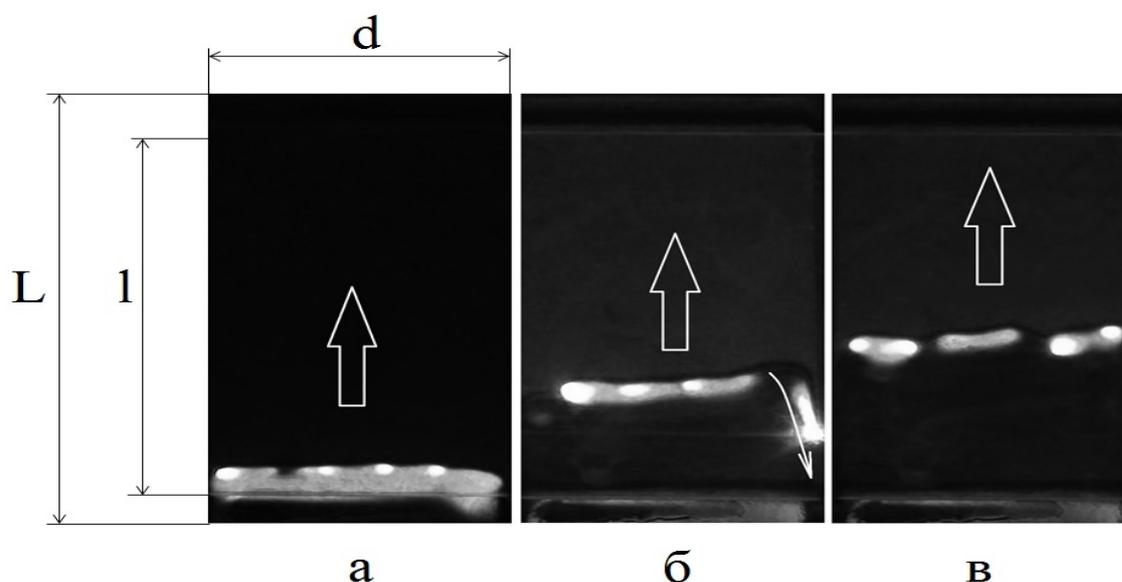


Рис.2. Горение слоя порошка титана в сквозном плоском канале:  $L = 120 \text{ мм}$ ,  $l = 100 \text{ мм}$ ,  $d = 64 \text{ мм}$ ,  $\delta = 4 \text{ мм}$ ,  $h = 3 \text{ мм}$ . Время от начала горения в плоском канале под кварцевым стеклом: 14 сек (а), 102 сек (б), 159 сек (в). Стрелки указывают направление распространения горения.

На начальном этапе (см. рис.2 а) после инициирования горения слоя порошка раскалённой электрической спиралью формируется сплошной неоднородный волновой режим. Установившийся фронт горения состоит из ярких очагов, соединенных между собой участками с менее интенсивным свечением, или формируются ячеистые волновые структуры, которые могут содержать несколько очагов (рис.2 б,в).

На рис.3 представлены: фотография горящей сверху вниз наклонной поверхности слоя порошка титана и фотография поверхности слоя после завершения опыта. Первое изображение является фотоколлажем поверхности слоя, на котором в соответствующем им месте вставлены фотографии зон горения в различные моменты

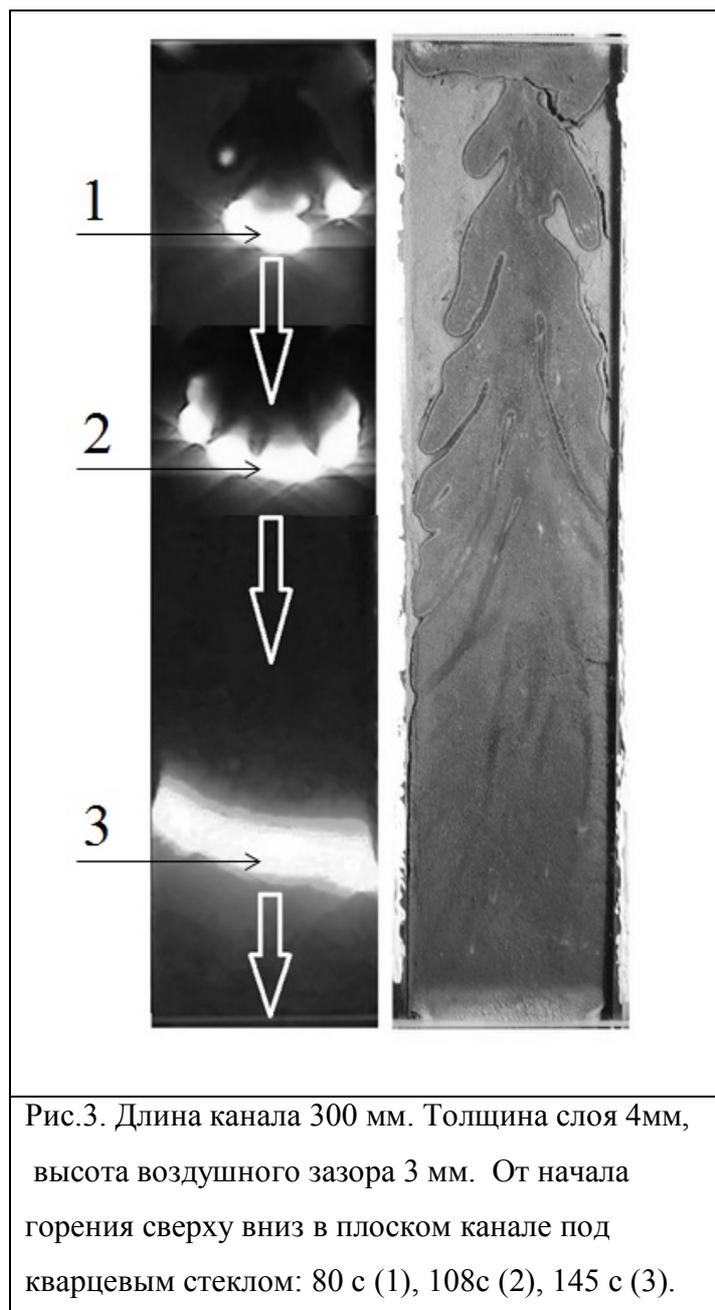


Рис.3. Длина канала 300 мм. Толщина слоя 4мм, высота воздушного зазора 3 мм. От начала горения сверху вниз в плоском канале под кварцевым стеклом: 80 с (1), 108с (2), 145 с (3).

времени. Длина канала 300 мм, высота воздушного зазора над поверхностью слоя 3 мм. Инициирование горения открытой части слоя перед входом в канал осуществлялось спиралью с керамическим сердечником для увеличения и выравнивания теплового импульса. Длина спирали почти совпадала с шириной слоя. После зажигания открытой части поверхности горение вглубь канала начиналось в ячеистом режиме с постепенным увеличением и слиянием ячеек в сплошной фронт. Наблюдалось формирование сплошной фронтальной структуры, при этом скорость распространения горения непрерывно росла

Этот эффект объясняется созданием условий для роста естественной конвекции по мере

распространения горения по каналу вниз. Скорость распространения сплошного фронта на порядок превышает скорость движения ячеистого.

## ВЫВОДЫ

Исследовано влияние конвективного переноса воздушной смеси при фильтрационном горении слоя порошка металла в сквозном канале на режимы горения. Теоретически и экспериментально установлено связь отвода инертных и примесных газов из пористой среды процессе горения на режимы экзотермического превращения, процессы структурированности фронта горения, тепло-фильтрационной устойчивостью волны, скоростью его распространения, полнотой превращения

конденсированного вещества. Показано, что создание условий для роста конвективного отвода инертных газов от зоны гетерогенного горения в сквозном наклонном канале приводит к увеличению полноты сгорания конденсированного горючего.

Зависимость естественно конвективных течений газа в наклонных каналах от положения фронта горения слоя порошка металла приводят к перестройке структуры зоны реакции. Последовательность трансформации режимов:

- разрушение сплошного фронта и формирование неоднородного или ячеистого режимов из-за увеличения концентрации инертного газа в зоне реакции на начальной стадии процессов установления конвективного переноса,
- слияние ячеек горения и формирование устойчивого сплошного фронта при развитии конвективного переноса газа по мере заполнения канала горячими газообразными продуктами,
- при распространении горения слоя порошка снизу-вверх по мере движения фронта происходит разрушение плоского фронта, формирование неоднородных, и ячеистых волновых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №16-03-00874

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г.Шкадинский, ФГВ, 5, (2010) 28-36.
- [2] А.Н.Фирсов, Н.И.Озерковская, К.Г.Шкадинский, ФГВ, 4, (2010), 3-12.
- [3] С.В.Костин, П.М.Кришеник, Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г.Шкадинский ФГВ, 1, (2012) 1-11.
- [4] С.В.Костин, К.Г.Шкадинский, Докл.РАН. 2 (2010) 182-185.
- [5] С.В.Костин, П.М.Кришеник, К.Г.Шкадинский, Хим. физика, 5, (2015) 58-65.
- [6] С.В.Костин, П.М.Кришеник, К.Г.Шкадинский, ФГВ, 1, (2014) 49-58.
- [7] S.V.Kostin, P.M.Krishenik, Intern. Journal of SHS, 2, (2013) 88–92.
- [8] К.Г.Шкадинский, Хим. физика, 6, (2014) 42-46.
- [9] П.М.Кришеник, С.А.Рогачев, К.Г.Шкадинский, Хим. физика, 3, (2014) 52-61.