

## ЯЧЕИСТЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

П.М. Кришеник<sup>1\*</sup>, С.В. Костин<sup>1</sup>, Н.И. Озерковская<sup>1</sup>, К.Г. Шкадинский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*[petr@ism.ac.ru](mailto:petr@ism.ac.ru)

Самоподдерживающийся фронтальный режим фильтрационного горения пористых составов реализуется в условиях экзотермического химического взаимодействия состава с газовым реагентом, поступающим в активную зону реакции путем фильтрации. В процессах горения порошка металлов используются газы (азот, кислород, водород) для образования конденсированных продуктов реакции (нитридов, оксидов, гидридов). При таком взаимодействии пористых тел с газами диффузионный массоперенос в газовой фазе отсутствует. Содержание газа в пористом теле при обычных давлениях недостаточно для реализации высокой полноты химического превращения. Поэтому процессы горения пористых сред существенно зависят не только от характера химического превращения конденсированной фазы и теплопереноса, но и фильтрации газа в зону реакции [1]. Из экспериментальных и теоретических исследований горения пористых сред в режиме естественной фильтрации газа [2–5] следовало, что в условиях потери устойчивости плоского фронта, дефицита массы активного газа во внутрипоровом пространстве могут устанавливаться различные неоднородные режимы распространения фронта, в том числе ячеистые.

В представленной работе численно и экспериментально исследуется нелинейная динамика формирования и распространения ячеистых режимов горения цилиндрически симметричных образцов. Исследуются процессы потери устойчивости плоского фронта, формирования и распространения самоподдерживающихся неоднородных волновых структур.

С помощью нестационарной математической модели численно исследуется горение недеформируемой пористой матрицы цилиндрически симметричной формы, в которую активный газовый реагент поступает извне через боковую проницаемую поверхность за счет перепада внешнего давления и внутрипорового давления в зоне реакции. Теплообмен через боковую поверхность обусловлен массообменом с внешней

газовой средой, имеющей постоянную температуру. Проницаемость среды варьируется в широком диапазоне параметров. Иницирование горения осуществляется периодически-возмущенным высокотемпературным источником тепла в центре цилиндра. Теплообмен пористого слоя с непроницаемой подложкой задает некоторый уровень теплопотерь (параметр задачи). Верхняя поверхность цилиндра предполагалась теплоизолированной и непроницаемой. Через нижнюю газонепроницаемую поверхность осуществляется теплообмен по закону Ньютона. Процесс горения инициируется в центре цилиндра высокотемпературным импульсом тепла. После зажигания формируется квазистационарный цилиндрически симметричный фильтрационный фронт, который «забывает» флуктуации иницирования, его структура и скорость горения медленно меняются в зависимости от расстояния до открытой поверхности. Характерное время формирования фронта зависит от возмущения, в устойчивом режиме горения возмущение сглаживается и горение «забывает» процесс зажигания.

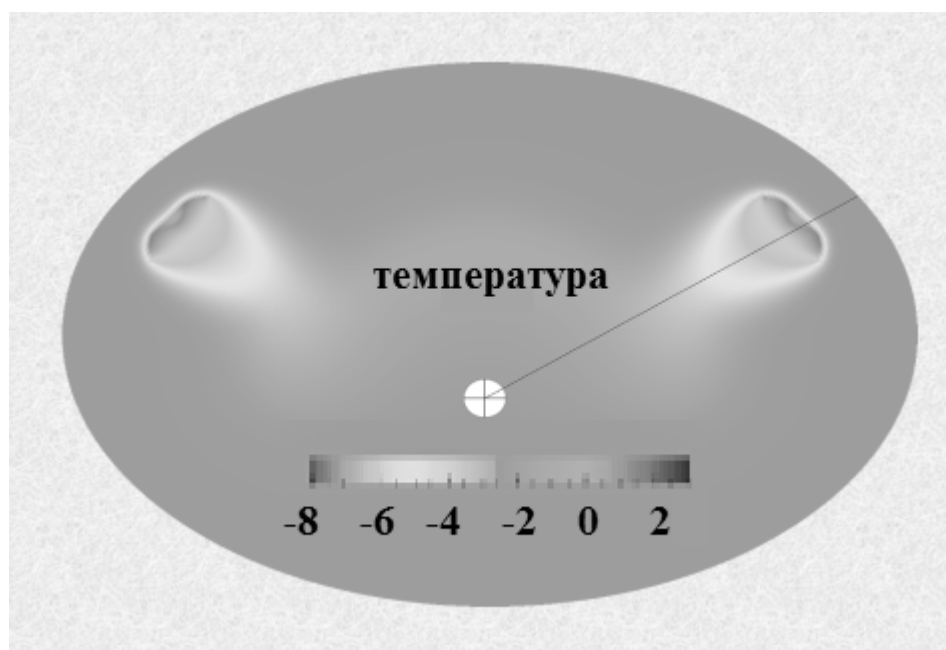


Рисунок 1. Пространственное распределение температуры при горении цилиндрического образца в ячеистом режиме.

После иницирования фронтального процесса из-за большой кривизны фронта фильтрация газа обеспечивает интенсивное химическое тепловыделение в зоне реакции. Полная глубина превращения достигается из-за интенсивной фильтрации газового реагента. Такой режим реализуется после зажигания горения в центре образца и при приближении горения к открытой поверхности пористого образца. В обоих

случаях фильтрация газового реагента не лимитирует процесс химического взаимодействия. В промежуточном положении возможно формирование режима неполного превращения, когда скорость фронта горения определяется фильтрационным потоком газового реагента. Отдаляясь от центра цилиндра фронт уменьшает свою кривизну, что приводит к дефициту активного газа в реакционной зоне. Плоский однородный фронт горения теряет устойчивость, зона реакции искривляется и формируются отдельные реакционные высокотемпературные зоны. В дальнейшем эти зоны трансформируются в изолированные ячейки со своей структурой (рис. 1).

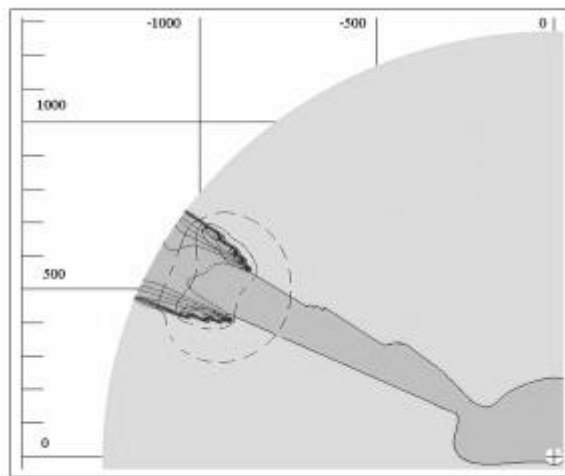


Рисунок 2. Пространственное распределение продуктов горения при распространении ячейистого фронта; изолинии давления газа и температуры.

Ячейки перемещаются в направлении боковой поверхности цилиндра, через который газ поддается извне в зону реакции. Формирование отдельных «привилегированных» участков фронта горения приводит к улучшению фильтрационного транспорта газа в зону реакции ячейки. При распространении ячейистого фронта вне ячеек отсутствует химическое превращение конденсированного слоя, так как в этих областях температуры пористого слоя низкие. Дефицит газового реагента стимулирует формирование и распространение ячейистых структур в квазистационарном режиме, определяет их количество и размер. Размеры очага, колебательные характеристики ячейистой волны зависят от степени удаления зоны реакции ячейки от боковой поверхности (рис. 2).

Для экспериментального анализа горения слоя цилиндрической формы используется образец в форме дюралевого блюда (как чашка Петри) с внутренним диаметром 70 мм, высота бортиков от доньшка равна 9 мм. На дно чашки насыпан слой порошка окиси титана  $TiO_2$  толщиной  $\sim 7$  мм, который используется в качестве инертной теплоизолирующей подложки. Затем на теплоизолирующий слой насыпается порошок титана ПТМ (размер частиц менее  $\sim 100$  мкм) слоем толщиной 2 мм, вес слоя титана  $\sim 11,2$  г). Массовое содержание водорода в исходном порошке 0,1%. Высота двухслойной засыпки равна высоте бортика дюралевого «блюда». Поверхность прикрыта кварцевым стеклом после установки в центре блюда спирального элемента, с помощью которого инициируется процесс горения порошка. Зазор для подвода газового реагента находился на его периферии, так как стекло приподнималось над ванночкой с помощью винтиков. В процессе горения фильтрация активного газового реагента реализовывалась через щель между слоем пористого конденсированного реагента и прозрачной плоской стенкой, расположенной параллельно пористому слою.

Формирование и распространение волны фильтрационного горения пористого конденсированного вещества проводится в условиях фильтрации воздуха вдоль щели между пористой гетерогенной средой и плоской стенкой. Высокая проницаемость гетерогенной среды регулируется высотой зазора.

На рисунке 3 проиллюстрирован процесс горения слоя титана в дюралюминиевом блюде. На начальном этапе после инициирования горения слоя порошка раскаленной электрической спиралью формируется однородный плоский фронт горения. Он характеризуется интенсивным взаимодействием титана с кислородом и азотом, газ фильтруется навстречу фронту. На подложке из диоксида титана сплошной однородный фронт горения, распространяющийся в режиме встречной фильтрации газа – поток воздуха извне направлен навстречу фронту. Сильное свечение продуктов горения свидетельствует о высокой интенсивности химического реагирования титана с воздушной смесью. Большая кривизна поверхностного фронта способствовала формированию однородной устойчивой волновой структуры (рис. 3а). Удаляясь от центра цилиндрической формы кривизна фронта увеличивалась, что привело к нехватке активного газа в зоне реакции. Начиналось разрушение однородного фронта с дальнейшим формированием трех высокотемпературных ячеистых структур (рис. 3б). Ячеистый фронт распространялся в колебательном режиме. При приближении ячеек к источнику газа размеры зоны реакции ячеек увеличивались (рис. 3в), частота колебаний ячеек росла, скорость распространения фронта уменьшалась. При

незначительном удалении ячеек от боковой поверхности образца, зона реакции резко увеличивалась и могла содержать несколько высокотемпературных очагов. При горении слоя титана на слое диоксида титана, когда теплопотери в подложку незначительные, наблюдается обратное горение в ячеистом режиме.

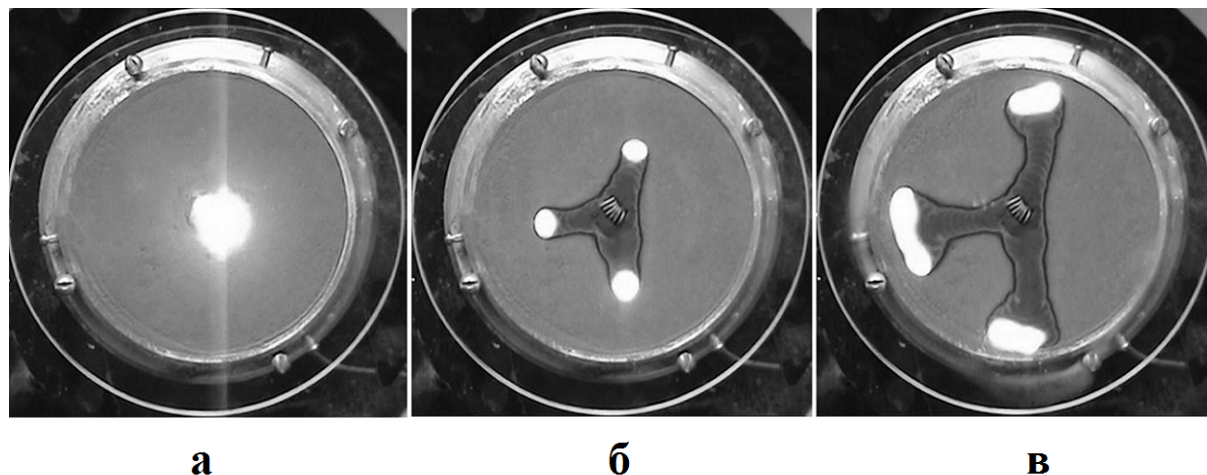


Рисунок 3. Горение слоя порошка титана в дюралевом блюде. Время от начала горения слоя титана под кварцевым стеклом: а – 14 сек, б – 38 сек, в – 87 сек.

### **Выводы.**

Экспериментально и теоретически показано, что в условиях неустойчивости фильтрационного фронта горения пористых образцов цилиндрической формы, когда горение инициируется в центре образца, возможна перестройка устойчивого плоского фронта в ячеистый режим горения. Увеличение фильтрации газа при приближении горения к источнику газа, приводит к перестройке ячеистого фронта в неоднородный режим горения. С уменьшением дефицита газа частота колебаний и скорость распространения ячеистого фронта падают. С уменьшением внешних теплопотерь реализуется обратное горение слоя порошка в ячеистом режиме.

### **Литература.**

- [1] А.П. Алдушин, Б.С. Сеплярский, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 16, (1980) 36–41.
- [2] Н.И. Озерковская, А.Н. Фирсов, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 46, (2010) 28–36.
- [3] С.В. Костин, П.М. Кришеник, Н.И. Озерковская, А.Н. Фирсов, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 48, (2012) 1–11.
- [4] С.В. Костин, К.Г. Шкадинский, Доклады РАН, 435, (2010) 182–185.
- [5] С.В. Костин, П.М. Кришеник, К.Г. Шкадинский, Хим. физика, 34, (2015) 58–65.