

# **ВЛИЯНИЕ СИЛ ГРАВИТАЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ФРОНТА ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ СРЕД.**

П. М. Кришеник\*, С. В. Костин, К.Г.Шкадинский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*petr@ism.ac.ru

В работе представлены экспериментальные исследования структурированности фильтрационного фронта горения слоя порошка титана. Показано, что гетерогенное горение вблизи критических условий его существования при ограничении подвода газообразного реагента в зону реакции и воздействия гравитационных сил, сопровождается перестройкой плоского однородного фронта в более сложные волновые структуры: ячеистые, поперечно-ячеистые, неоднородные. Особенностью исследуемого процесса является наличие газообразных примесей, влияющих на газообмен в зоне реакции, потеря устойчивости плоского фронта, формирование и распространение неоднородных и ячеистых волновых структур.

## **ВВЕДЕНИЕ.**

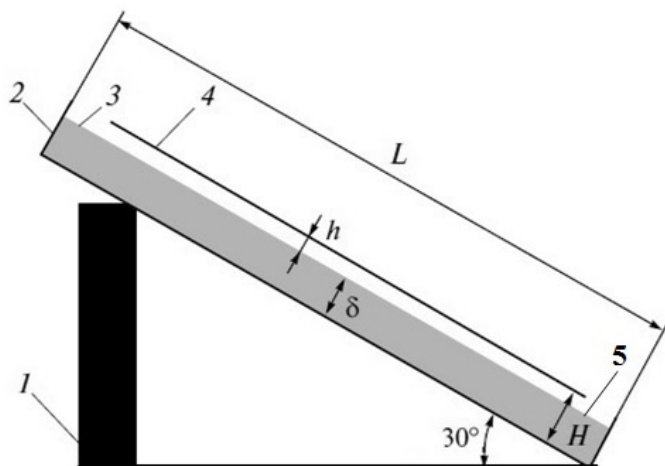
В [1-3] были разработаны многомерные математические модели с помощью которых исследованы ячеистые волновые структуры формирующиеся при потере устойчивости плоского фронта горения пористых систем. Экспериментальные исследования структурированности фильтрационного фронта при горении высокоэнергетических систем в режиме естественной фильтрации представлены в [2-5]. Установлено, что в условиях неустойчивости плоского фронта фильтрационного горения пористых высокоэнергетических систем с конденсированными продуктами горения и недостатка активного газа в зоне реакции плоский фронт “распадается” на отдельные ячейки самоподдерживающегося химического превращения.

Экспериментальное исследование инициирования и распространения ячеистых волновых структур при горении слоя порошка титана проводились в прямоугольном канале, расположенном горизонтально, когда гравитационными силами можно пренебречь. Использование наклонного канала приводит к возникновению свободно конвективных течений газа обусловленных действием гравитационных сил, которые могут оказать заметное влияние на устойчивость фильтрационного фронта, критические условия существования горения, формирования и распространения ячеистых режимов горения.

В представленной работе изложены результаты экспериментального анализа нелинейной динамики горения пористых сред, структуры зоны горения слоя порошка металла в сквозных воздушных наклонных каналах. Исследуются процессы перестройки волновых режимов при потере устойчивости плоского фронта горения порошка титана по мере движения фронта в пористой среде с учетом влияния сил тяготения. Основным результатом исследования заключается в установлении закономерностей формирования неоднородных и ячеистых волновых структур и раскрытие физических механизмов распространения структурированного фронта.

### ЭКСПЕРИМЕНТ.

Моделью плоского канала являлись наклоненные металлические кюветы. На схеме 1-опора, 2-кювета, 3- слой порошка титана, 4- кварцевое стекло, 5-место поджигания. Длина кюветы  $L = 120\text{ мм}$  или  $L = 320\text{ мм}$ , ширина кюветы  $64\text{ мм}$ , высота бортиков  $H = 7\text{ мм}$ . На дно кюветы насыпался порошок титана ПТС-1 (размер частиц менее  $200\text{ мкм}$ ) слоем толщиной  $\delta = 4\text{ мм}$  и плотностью  $1,6\text{ г/см}^3$ . Массовое содержание водорода в исходном порошке  $0,3\%$ . Сверху кювета прикрывалась полированным кварцевым стеклом длиной  $100\text{ мм}$  или  $300\text{ мм}$  (в зависимости от размера кюветы), опиравшимся на шлифованные бортики.



Воздушный зазор являлся околокритическим: при его дальнейшем уменьшении горение слоя прекращалось сразу после инициирования. В торцевых частях образца оставляли щели, т.е. вблизи торцов кювета оставалась открытой. Кювета располагалась в наклонном положении:  $30^\circ$  к горизонту с минимальным контактом с опорой.

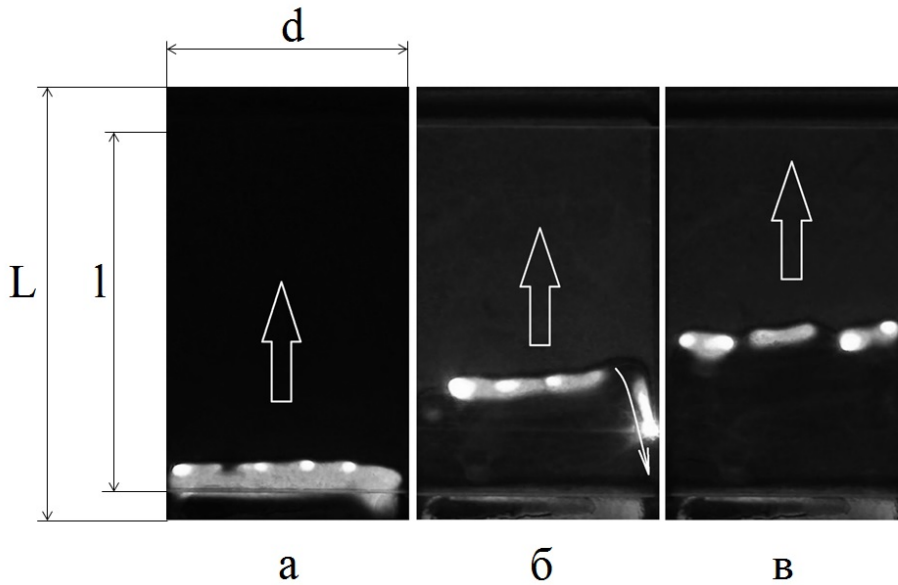
В предлагаемой модельной системе, в процессе горения газ подводится в зону реакции по щели между пористой гетерогенной средой и плоской стенкой в виде

кварцевого стекла. При распространении горения в наклонном сквозном канале снизу-вверх, - силы конвекции действовали 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 на процесс горения слоя порошка титана в наклонном металлическом сквозном канале в условиях регулируемого фильтрационного транспорта. В качестве воздушного реагента использовался атмосферный воздух. Титан при высоких температурах активно взаимодействует как с кислородом, так и азотом, образуя конденсированные продукты  $TiO_2$  и  $TiN$ . Горение инициировалось вблизи одной кромки кюветы спиралью с керамическим сердечником диаметром 3 мм. В процессе горения активные газовые компоненты расходовались в зоне реакции, что приводило к локальному снижению давления.

После инициирования горения раскаленной спиралью фронт распространялся по поверхности засыпки. Перепад давления в зазоре в процессе горения незначительный, но он управлял газовым потоком и влиял на направление движения волны горения. Область пониженного давления в процессе горения сосредоточена в относительно узкой зоне реакции. Таким образом, подвод газа осуществлялся в саморегулируемом фильтрационном режиме через зазор и щели.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.**

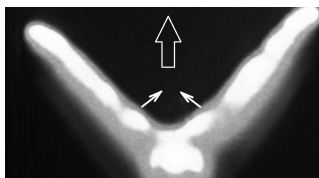
При инициировании горения снизу по мере продвижения зоны горения в наклонном канале меняются силы конвекции с изменением температуры, состава и степени заполнения горячей газовой смесью ограниченного пространства канала и удалённостью зоны экзотермической реакции от верхнего открытого конца канала. На начальном этапе горения формируется сплошной неоднородный многоочаговый фронт. Установившийся фронт состоит из ярких очагов, соединенных между собой участками с менее интенсивным свечением. Очаги совершают возвратно-поступательное движение вдоль линии фронта. Характер движения очагов в неоднородном фронте пульсирующий, на поверхности продукта горения появляются поперечные зеброидные полосы, по которым можно восстановить траекторию и автоколебательные характеристики распространения очагов.



Сквозной канал с параметрами:  $L = 120 \text{ мм}$ ,  $l = 100 \text{ мм}$ ,  $d = 64 \text{ мм}$ ,  $\delta = 4 \text{ мм}$ ,  $h = 3 \text{ мм}$ . Время от начала горения в плоском канале под кварцевым стеклом: 14 с (а), 102 с (б), 159 с (с). Стрелки указывают направление распространения горения.

По мере удаления зоны горения от нижнего зазора, наблюдается сужение сплошного неоднородного фронта, который распространяется только по центральной части канала. При такой структуре фронта, у бортов кюветы остается непрореагировавший порошок титана. Прогрев этого порошка от высокотемпературных продуктов горения при фильтрации воздуха в спутном направлении, приводит к формированию фронта догорания. Периодически рождающийся фронт движется вниз вдоль бортиков кюветы навстречу потоку воздуха. Трансформация зоны горения завершается установлением фронта из отдельных ячеек горения сложной структуры. Каждая ячейка содержит переменное число подвижных очагов горения, отличающихся повышенной яркостью от остальной части зоны горения ячейки.

При конвективном горении в сквозных наклонных каналах длиной  $l = 300 \text{ мм}$ , расположенных под углом  $30^\circ$  к горизонту, наблюдалась



более сложная очерёдность изменения режимов горения: за этапом сужения и разделения сплошного фронта горения на ячейки в продолжение развития процесса следовал этап увеличения и объединения ячеек в сплошной неоднородный фронт. Затем, при приближении сплошного неоднородного фронта к открытому концу канала вновь наблюдалось его разрушение на ячейки.

Представленную последовательность изменения структуры фронта можно объяснить изменением силы конвекции с момента её формирования: увеличения конвекции по мере заполнения части канала горячей газовой смесью в начале процесса, - до её убывания по мере приближении зоны горения к открытому концу

Отдельного рассмотрения заслуживает гиперболическая (углообразная) форма сплошного фронта горения с вершиной направленной вниз, наблюдавшаяся на участке развитого конвективного горения примерно на середине длины реагирующего слоя. Изогнутая форма фронта, увеличение яркостной температуры, глубины превращения и количества расплавленного продукта в вершине дуги направленной вниз, навстречу восходящему потоку, связаны с особенностями макрокинетического механизма спутного режима горения с широкой зоной реакции. Наличие широкой зоны реакции обусловлено возможностью образования соединений с разной степенью окисления кислородом и азотом воздушной смеси, а также пространственным распределением зоны догорания по объёму из-за неравноступности поверхности частиц в толще порошкообразного слоя.

## **ВЫВОДЫ**

Исследовано влияние конвективного переноса воздушной смеси при фильтрационном горении слоя порошка металла в сквозном канале на режимы горения в поле сил тяготения. Установлена связь естественно конвективного движения воздушной смеси с процессами 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 режима 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 поддержке гранта РФФФ №16-03-00874

### **Литература**

- [1] Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г.Шкадинский, ФГВ, 46, 5, (2010) 28-36
- [2] С.В.Костин С. В., К.Г.Шкадинский, Докл. АН, 2010. 435, 2 (2010) 182-186.
- [3] С.В.Костин, П.М.Кришеник, Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов., К.Г.Шкадинский, ФГВ, 48, 1, (2012), 28-36.
- [4] С.В.Костин, П.М.Кришеник, К.Г.Шкадинский, ФГВ. 50, 1, (2014) 49-57.
- [5] S.V.Kostin, P.M.Krishenik Inter. Journal of SHS, 22,2, (2013) 88-92.