

УДК 544.452:544.427

## ЯЧЕИСТЫЕ И НЕОДНОРОДНЫЕ РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТИТАНА В ПОЛЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ

П. М. Кришеник, С. В. Костин

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка  
petr@ism.ac.ru, kos@ism.ac.ru

Исследовано формирование структуры зоны горения слоя порошка титана в наклонных воздушных каналах прямоугольного профиля при естественной фильтрации газа. 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. Особенности исследуемого процесса являются наличие газообразных примесей, влияющих на газообмен в зоне реакции, потеря устойчивости плоского фронта, формирование и распространение неоднородных и ячеистых волновых структур.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, ячеистые режимы, фингер, фильтрационное горение, устойчивость фронта, естественная конвекция.

DOI 10.15372/FGV20160303

### ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2] были разработаны многомерные математические модели, с помощью которых исследованы нестационарные волновые структуры, формирующиеся при потере устойчивости плоского фронта горения пористых систем. В дальнейшем изменение структуры фронта при горении высокоэнергетических систем в режиме естественной фильтрации газа теоретически и экспериментально исследовалось в [3–5]. В этих работах представлены результаты анализа формирования и распространения ячеистых режимов, при которых сплошной фронт трансформируется в изолированные зоны реакций экзотермического тепловыделения. Установлены зависимости числа и формы, размеров ячеек от определяющих теплофизических, макрокинетических и фильтрационных параметров гетерогенной системы, от геометрии и размеров пористых систем, газообмена с окружающей средой. Исследования подтвердили гипотезу о том, 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 пре-

вращения. Показано, что ячеистая фронтальная структура позволяет обеспечить оптимальный транспорт газового реагента в сосредоточенную зону реакции ячейки в условиях затруднения фильтрации. С помощью численных и экспериментальных исследований обнаружен автоколебательный характер распространения ячеистых режимов горения. В [6] на основе данных теоретического анализа неустойчивого горения химически активных гетерогенных систем экспериментально исследована динамика распространения неустойчивого ячеистого фронта, изучена эволюция ячеистой фронтальной структуры на отдельном периоде пульсаций. В [7] при анализе формирования и распространения ячеистых волновых структур при горении слоя порошка титана на горизонтальной поверхности обнаружен сплошной неоднородный фронт, который представлял собой систему очагов интенсивного горения, связанных между собой участками фронта с меньшей интенсивностью. Ячеистый и сплошной неоднородный режимы реализуются в условиях потери устойчивости плоского фронта и ограниченного подвода окислителя в зону реакции. Линейно расположенные очаги не пульсируют, на поверхности сгоревшего слоя титана рельефно выделяются следы — треки. Их более интенсивная окраска свидетельствует о поперечной неоднородности скорости тепловыделения

и глубины превращения во фронте экзотермической реакции.

Анализ фильтрационных режимов горения гетерогенных систем с помощью многомерных математических моделей [1–5] показал, что ячеистые режимы горения формируются в пористых системах, где давление газа в процессе горения меняется незначительно. В [7, 8] этот факт получил экспериментальное подтверждение. Установлено, что при горении слоя порошка металла с регулируемой фильтрацией газа в зону реакции ячеистые и неоднородные волновые структуры реализуются в квазиизобарических условиях переноса. В [9] были изложены общие математические подходы к анализу горения пористых составов в фильтрационном режиме в слабоградиентных полях давления. В [10] исследована устойчивость распространения фронта горения в пористых системах к одномерным и пространственным возмущениям в условиях квазиизобарического переноса газа в зону горения. В [11], учитывая особенности горения таких систем, авторы предложили математическую модель фильтрационного горения пористых сред в многокомпонентном газе с учетом двухстадийности экзотермического превращения конденсированной фазы, исследована зависимость структуры и режимов горения пористых сред от концентрации инертного газа.

Экспериментальное исследование инициирования и распространения ячеистых волновых структур при горении слоя порошка титана [3–8] выполнялось в прямоугольном канале, расположенном горизонтально, что позволяет пренебречь гравитационными силами. 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.

Влияние гравитационных сил на горение пористых систем теоретически исследовалось в [12–14], где основное внимание уделено анализу квазистационарных волновых режимов горения пористых систем в условиях сильного фильтрационного сопротивления. Трансформация структуры зоны горения, ее устойчивость в этих условиях не рассматривались.

В представленной работе изложены ре-

зультаты экспериментального исследования нелинейной динамики горения пористых сред, структуры зоны горения слоя порошка металла в сквозных наклонных воздушных 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. Основная цель исследования — установить закономерности формирования неоднородных и ячеистых волновых структур и физические механизмы распространения структурированного фронта.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ СЛОЯ ПОРОШКА МЕТАЛЛА

Моделью плоского канала (рис. 1) являлись металлические кюветы длиной 120 мм и 320 мм, шириной 64 мм с высотой бортов 7 мм. На дно кюветы насыпали 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 кювету прикрывали полированным кварцевым стеклом длиной 100 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 дальней-

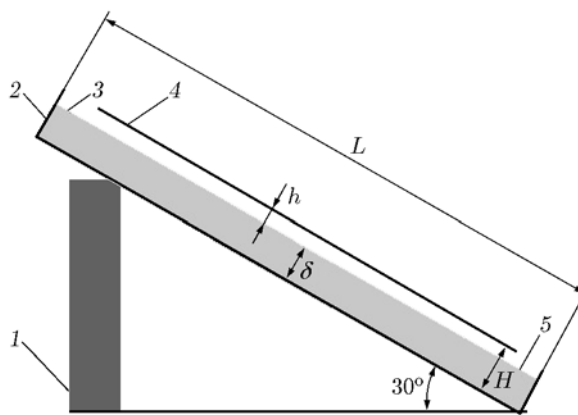


Рис. 1. Модель прямоугольного сквозного канала:

1 — опора, 2 — кювета, 3 — слой порошка титана, 4 — кварцевое стекло, 5 — место поджигания при горении снизу вверх,  $\delta$  — толщина слоя порошка,  $h$  — высота воздушного зазора,  $H$  — высота бортиков кюветы,  $L$  — длина кюветы

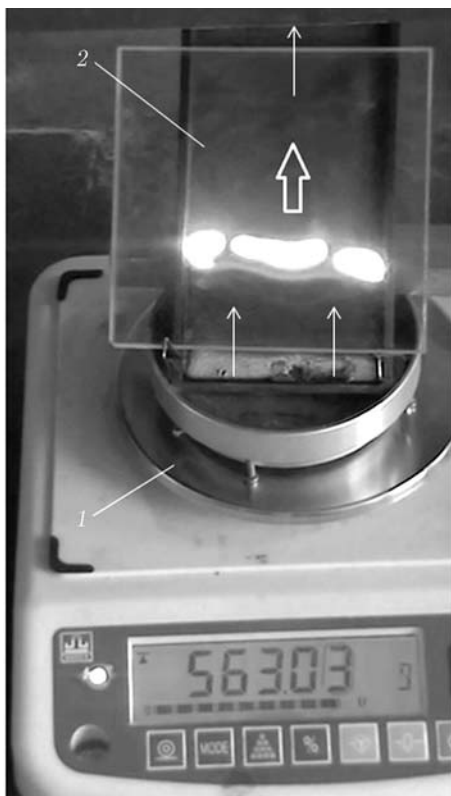


Рис. 2. Фотография экспериментальной сборки, помещенной на весы:

1 — весы, 2 — сборка с кюветой; толстая стрелка — направление распространения горения, тонкие стрелки — направление движения газа

шем уменьшении горение слоя прекращалось сразу после инициирования. В торцевых частях образца оставляли щели, т. е. вблизи торцов кювета оставалась открытой. Кювета располагалась под углом  $30^\circ$  к горизонту с минимальным контактом с опорой. На рис. 2 представлена фотография экспериментальной сборки, помещенной на весы. В некоторых опытах в качестве датчиков движения газа в процессе горения использовали хлопчатобумажные нити длиной  $\approx 10$  мм, помещенные на поверхность слоя. Движение нити и продуктов ее горения (дыма) указывало направление и приблизительную скорость потока газа в зазоре и в окрестности зоны реакции. Опыты проводили в воздушной среде при температуре  $17 \div 25$  °С и абсолютной влажности воздуха  $3.7 \div 15$  г/м<sup>3</sup>.

В предлагаемой модельной системе газ подводится в зону реакции по щели между пористой гетерогенной средой и плоской стенкой в виде кварцевого стекла. В зависимости от направления распространения горения в наклон-

ном сквозном канале — сверху вниз или снизу вверх — силы конвекции действовали соответственно встречно или спутно направлению горения. По мере продвижения зоны горения в наклонном канале возможно изменение интенсивности конвекции с изменением температуры, состава и степени заполнения ограниченного пространства канала горячей газовой смесью и в зависимости от удаленности зоны экзотермической реакции от верхнего открытого конца канала. Основной акцент сделан на исследование влияния гравитационных сил на горение слоя порошка титана в наклонном металлическом сквозном канале в условиях регулируемого фильтрационного транспорта.

### ГЕТЕРОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ СНИЗУ ВВЕРХ В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Формирование и распространение волны фильтрационного горения пористого конденсированного вещества проходит в условиях фильтрации воздуха вдоль щели между пористой гетерогенной средой и плоской стенкой. Высокая проницаемость гетерогенной системы, которая регулируется высотой зазора  $h$  (см. рис. 1), обеспечивает протекание химической реакции в условиях слабовозмущенного поля давления. Более детально процессы фильтрационного переноса при горении слоя порошка металла в таких системах рассмотрены в теоретической работе [11].

При реализации движения фронта снизу вверх в сквозном канале порошок зажигается спиралью, контактирующей с открытой частью поверхности у нижнего конца. По мере движения фронта вверх формируется конвективный поток. Очевидно, что это отражается на количестве и составе газа перед и за фронтом горения конденсированной фазы. Можно выделить несколько этапов волнового превращения пористого слоя металла, которыеобладают своими характерными особенностями. Фотографии на рис. 3 иллюстрируют процесс горения слоя титана толщиной  $\delta = 4$  мм при высоте воздушного зазора над поверхностью слоя  $h = 3$  мм в сквозном плоском канале длиной 100 мм. Длина сквозного канала совпадает с длиной стекла  $l$ .

На начальном этапе (см. рис. 3,а) после инициирования горения слоя порошка раскаленной электрической спиралью формируется сплошной неоднородный волновой режим. Он

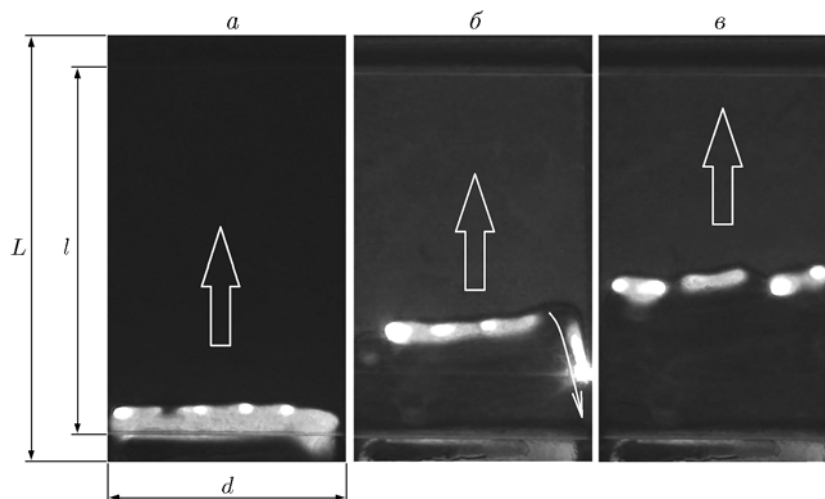


Рис. 3. Горение слоя порошка титана в сквозном плоском канале:

$L = 120$  мм,  $l = 100$  мм,  $d = 64$  мм,  $\delta = 4$  мм,  $h = 3$  мм; время от начала горения в плоском канале под кварцевым стеклом:  $a$  — 14 с,  $b$  — 102 с,  $v$  — 159 с; стрелки — направление распространения горения

характеризуется интенсивным взаимодействием титана с кислородом и азотом. Направление газовых потоков в щели на этом этапе определялось по направлению движения нитей, расположенных на поверхности слоя порошка, и по направлению дыма, образующегося при сгорании нитей. Фильтрационный поток воздуха извне направлен вдоль щели вслед движущемуся фронту горения (см. рис. 2). В зоне реакции неоднородного фронта расходятся кислород и азот. Прогретый инертный и примесные газы под действием гравитационных сил «выносятся» в область перед фронтом горения — верхнюю часть канала. Установившийся фронт горения состоит из ярких очагов, соединенных между собой участками с менее интенсивным свечением, или формируются ячейчатые волновые структуры, которые могут содержать несколько очагов (рис. 3, в). Особенностью ячейчатого горения, распространяющегося вверх по наклонному каналу, является зигзагообразное направление движения ячеек: после каждого очередного разворота или образования новой ячейки траектория ее движения примыкает к периметру границы, отделяющей порошок титана от продукта реакции. При таком «скольжении» поперек слоя ячейки могут делиться, объединяться, нахлестываться. Формирование поперечно-ячейчатых режимов горения связано со спутным характером фильтрации активного газа и поперечной неоднородностью скорости тепловыделения и глубины превраще-

ния. В условиях переноса активного газа через продукты горения и неоднородности фронта формируется поперечный вектор скорости распространения ячейки. Сложение продольного и поперечного векторов скоростей приводит к зигзагообразной траектории движения зоны реакции ячейки. В результате вся поверхность покрывается продуктом, что является отличительной особенностью конвективного ячейчатого горения порошка в наклонном канале.

При горении слоя титана в горизонтальном канале в ячейчатом режиме поверхность прореагировавшего слоя приобретает форму пальцев — фингеров. Ячейчатые структуры распространяются вдоль продольной оси слоя в колебательном режиме [3, 5–9] на достаточном удалении друг от друга. За фронтом горения остаются значительные области непрореагировавшего титана.

Колебательный характер распространения ячеек и очагов сохраняется и при поперечно-ячейчатом режиме горения в наклонном канале. На поверхности продукта горения появляются поперечные зевровидные полосы, по которым можно восстановить траекторию их движения.

По мере удаления горения от открытого торца нижней части канала наблюдается сужение сплошного неоднородного фронта (см. рис. 3, б), распространяющегося по центральной части канала. При такой структуре фронта у бортов кюветы остается непрореагировав-

ший порошок титана. Прогрев этого порошка высокотемпературными продуктами горения при фильтрации воздуха в спутном направлении приводит к формированию фронта догорания. Фронт движется вниз вдоль бортиков кюветы навстречу потоку воздуха (тонкая стрелка на рис. 3,б). Возвратный режим был обнаружен и исследован при численном анализе ячеистых режимов горения пористого цилиндрического образца [2], формирующихся при спутной фильтрации газа. Периодически рождающийся и движущийся противоположно движению ячеистого фронта, он был назван угасающим. Можно сделать вывод, что возвратное горение сопутствует распространению ячеистого фронта горения при течении активного газа вслед движущемуся ячеистому фронту.

На рис. 4 представлено изменение скорости роста массы образца в процессе горения слоя порошка в наклонном канале. На начальной стадии объем, занимаемый горячим газом над высокотемпературной зоной горения, незначителен по сравнению с объемом сквозного канала. По мере продвижения фронта объем горячего газа увеличивается, но одновременно уменьшается высота канала перед фронтом. При горении слоя порошка в «коротком» канале в момент, когда холодный газ выдавлен из верхней части канала, расстояние от зоны горения до верхнего зазора может быть незначительным. В этом случае прогрев всего канала не приводит к увеличению потока воздуха в зону реакции и росту скорости реакции синтеза.

Действительно, при горении титана в канале длиной  $l = 100$  мм после формирования неоднородного фронта горения скорость роста массы образца резко уменьшается (см. рис. 4).

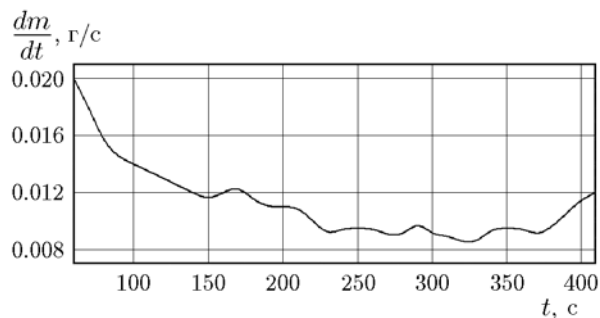


Рис. 4. Изменение скорости роста массы слоя при горении снизу вверх ( $\delta = 4$  мм,  $h = 3$  мм,  $l = 100$  мм)

Снижение скорости экзотермической реакции синтеза связано с ростом концентрации инертного газа вблизи зоны горения по мере потребления кислорода и азота воздуха. При сгорании слоя интенсивность экзотермического превращения и скорость горения слоя титана незначительны. Время сгорания слоя титана длиной 100 мм около 400 с, т. е. средняя скорость распространения горения  $\approx 0,25$  мм/с. При гетерогенной реакции синтеза нарастание массы реагирующего слоя в проведенных экспериментах составляло до 12 %, что дает возможность оценить фильтрующуюся массу примесного газа за время сгорания слоя. Учтем, что в исходной воздушной смеси содержится 1 % аргона и некоторое количество других инертных газов. Так как кислород и азот расходуются в зоне реакции, из закона сохранения массы следует, что количество примесных газов, которое сохранилось в фильтрующейся воздушной смеси, достигало 0,1 % массы титана.

Трансформация зоны горения завершается установлением фронта (см. рис. 3,б) из отдельных ячеек горения сложной структуры. Каждая ячейка содержит переменное число подвижных очагов горения, отличающихся повышенной яркостью от остальной части зоны горения ячейки. Неоднородность структуры ячеек хорошо наблюдалась визуально и фиксировалась фотовидеосъемкой при соответствующей экспозиции.

При конвективном горении в сквозных наклонных каналах длиной  $l = 300$  мм, расположенных под углом  $30^\circ$  к горизонту, наблюдалась более сложная очередность изменения режимов горения. За этапом сужения и разделения сплошного фронта горения на ячейки следовал этап увеличения и объединения ячеек в сплошной неоднородный фронт. Затем при приближении сплошного неоднородного фронта к открытому концу канала он вновь разрушался на ячейки (рис. 5).

Представленную последовательность изменения структуры фронта можно объяснить изменением скорости конвективного потока: увеличение конвекции по мере заполнения части канала горячей газовой смесью в начале процесса и ее убывание при приближении зоны горения к открытому концу (рис. 6).

Размещенные (в некоторых опытах) на поверхности слоя нити при попадании в зону горения сгорали с образованием дыма, который устремлялся вверх, обгоняя фронт (со скоро-

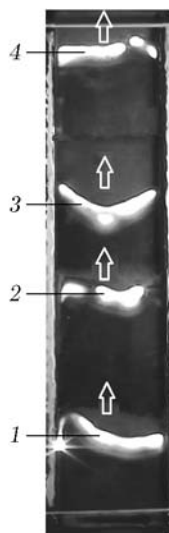


Рис. 5. Коллаж последовательного изменения структуры зоны горения по мере ее перемещения вверх:

$\delta = 4$  мм,  $h = 3$  мм,  $l = 100$  мм; стрелками указаны позиции зоны горения в моменты времени от начала горения в плоском канале под кварцевым стеклом 136 (1), 404 (2), 524 (3), 768 с (4)

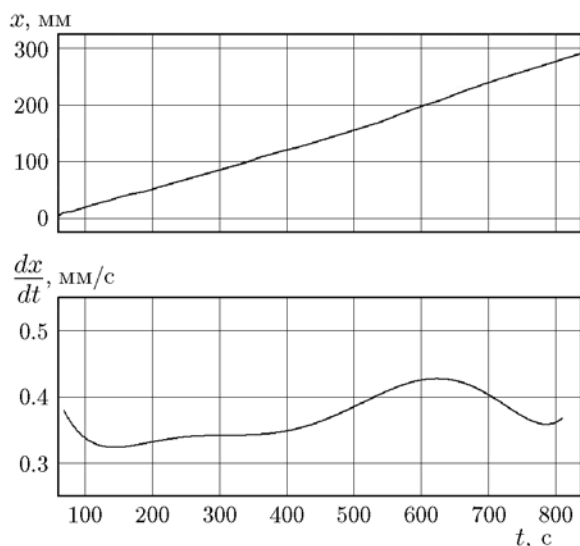


Рис. 6. Изменение координаты и скорости распространения горения во времени

стью  $\leq 10$  мм/с). Скорость струйки дыма от нитей, сгоравших наверху у конца канала, была заметно меньше, чем скорость струйки дыма из глубины канала.

При экзотермической реакции синтеза скорость изменения массы образца в ходе горения определяется скоростью поглощения газообразного реагента, т. е. интенсивностью экзотерми-

ческой реакции. При оценке массового потока воздушной смеси, втекающей в канал, массой дегазирующихся примесей можно пренебречь по сравнению с количеством поглощаемого реакционноспособного газа. Проведенная на этой основе нижняя оценка среднего значения массовой скорости воздушного потока составила 0.02 г/с при средней скорости распространения фронта горения 0.38 мм/с (в каналах длиной 300 мм). Эти значения выше полученных для «коротких» каналов длиной 100 мм (см. рис. 4). Следует также отметить, что часть слоя длиной 300 мм сгорала на неполную глубину: толщина прослойки несгоревшего титана внизу первой трети слоя ( $\approx 100$  мм длины) составляла  $\approx 0 \div 0.5$  мм. Неполнота окисления в глубине слоя объясняется недостаточно быстрым отводом инертных газов из зоны реакции на начальной стадии формирования конвективного переноса газа. В результате небольшое количество инертных газов в нижней части слоя приводит к формированию микродиффузионного режима превращения. В условиях теплопотерь это равносильно срыву горения.

Экспериментальные данные позволяют получить представление о формировании конвективного потока смеси газов, меняющей свой состав, массу, температуру и скорость при прохождении по каналу. В начале ячеистого горения, примерно в первой трети длины нижней части слоя, фиксировались редкие вспышки в газовой фазе над слоем порошка. Этот эффект связан с образованием гремучей смеси водорода и воздуха. Водород не только дегазируется из титана, но и образуется при взаимодействии паров воды с горячим порошком титана: частота вспышек заметно растет при увеличении влажности воздуха. После сгорания примерно первой половины слоя вспышки прекращаются, а на выходе из канала появляется поток пара или факел с прозрачным пламенем, присутствующим горению водорода. Следовательно, по мере заполнения части канала (перед зоной горения) горячей газовой смесью ее состав меняется. Увеличивается количество водорода и паров воды в зоне подогрева. Часть водяного пара конденсировалась на кварцевом стекле канала и стекала вниз к сплошному фронту горения, где вновь испарялась или вступала в реакцию. Прекращение вспышек над слоем порошка перед фронтом объясняется снижением концентрации кислорода при одновременном росте концентрации аргона, прошедшего через зо-

ну горения в составе воздушной смеси, активные газовые компоненты которой прореагировали с титаном. Расчеты показывают возможность скопления значительного количества аргона при сгорании воздушной смеси, достаточной для соответствующего роста массы слоя в реакции синтеза (увеличение массы слоя после опытов составляло  $11 \div 12$  %). Поэтому образующаяся горячая газовая смесь, содержащая водород и аргон, при выходе из канала, смешиваясь с воздушной смесью, вспыхивала с образованием устойчивого факела.

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 (рис. 7). По месту прохождения вершины дуги (как правило, по центральной оси слоя) на поверхности продукта оставалась «дорожка» из желтого диоксида титана — конечного продукта окисления кислородом воздуха, на фоне более темной поверхности слоя с меньшим содержанием кислорода (<17 %). Эта часть слоя спекалась в существенно более твердую массу, чем соседние хрупкие участки. Размещение теплоизолирующих керамических стержней между бортиками и реагирующим слоем не изменяло форму фронта. Следовательно, можно пренебречь возможной опережающей теплопередачей по стальным бортикам с ускорением горения примыкающего к ним порошка. Очевидно изогнутая форма фронта, увеличение яркости температуры, глубины превращения и количества расплавленного продукта в вершине

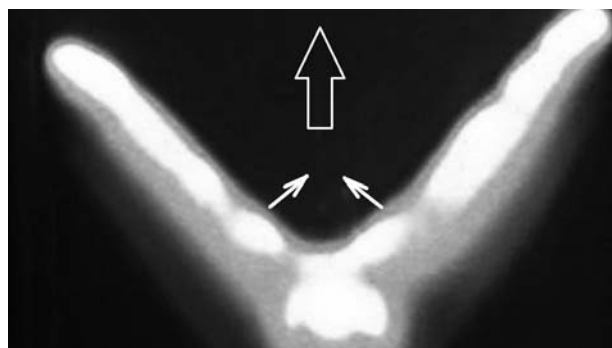


Рис. 7. Гиперболический фронт горения:

толстая стрелка — направление распространения фронта, тонкие стрелки — направление потока тепла в фокус фронта

дуги, направленной вниз, навстречу восходящему потоку, связаны с особенностями макрокINETического механизма спутного режима горения с широкой зоной реакции. Наличие широкой зоны реакции обусловлено образованием соединений с разной степенью окисления кислородом и азотом воздушной смеси, а также пространственным распределением зоны догорания по объему из-за неравнодоступности поверхности частиц в толще порошкообразного слоя.

Как известно [15], в отличие от горения пористых систем при встречном режиме фильтрации, в условиях спутной фильтрации полнота сгорания металла равна единице. Экзотермическая реакция должна заканчиваться при полном выгорании металла. Срыв горения и неполнота превращения могут быть связаны лишь с потерями тепла в направлении, перпендикулярном распространению фронта. В нашем случае горение слоя металла сопровождается существенными потерями тепла в металлическую подложку.

Случайный изгиб фронта и формирование поверхности с большой кривизной создают благоприятные условия для транспорта газового реагента и тепла в выпуклую часть фронта. Это приводит к повышению температуры и дает возможность продолжения реакции на этом участке фронта до большой степени и глубины окисления слоя порошка как раз в вершине дуги. При этом на соседнем, относительно «холодном» участке реакция прекращается раньше из-за теплопотерь в стальную подложку и кинетического торможения по мере окисления порошка титана. Поэтому реакционноспособный газ на этом участке с меньшей задержкой поступает к следующему участку прогретого слоя с большей концентрацией конденсированного горючего для продолжения экзотермической реакции окисления порошка титана. Такая трактовка позволяет, по мнению авторов, дать непротиворечивое объяснение наблюдаемому явлению — устойчивому распространению вогнутого фронта при развитой конвекции в сквозном канале.

#### ГЕТЕРОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ СВЕРХУ ВНИЗ В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

На рис. 8 представлены фотография горячей сверху вниз наклонной поверхности слоя порошка титана и фотография поверхности

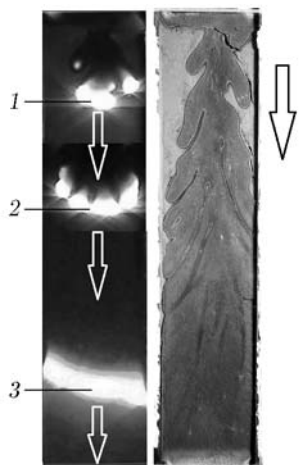


Рис. 8. Фотоколлаж зон горения и фотография поверхности продукта при горении слоя ( $\delta = 4$  мм,  $h = 3$  мм) в наклонном воздушном канале длиной  $l = 300$  мм:

стрелка справа — направление горения, стрелки слева — позиции зоны горения в моменты времени от начала горения сверху вниз в плоском канале под кварцевым стеклом 80 (1), 108 (2), 145 с (3)

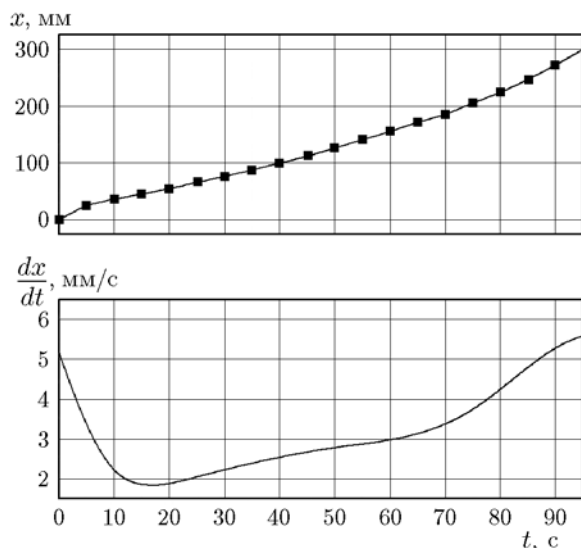


Рис. 9. Изменение координаты и скорости распространения горения (лидирующего участка фронта) слоя порошка титана ( $\delta = 4$  мм) в наклонном воздушном канале длиной  $l = 300$  мм ( $h = 3$  мм)

слоя после завершения опыта. Первое изображение является фотоколлажем поверхности слоя, на котором в соответствующих им местах вставлены фотографии зон горения в различные моменты времени. Длина канала  $l = 300$  мм, высота воздушного зазора над поверх-

ностью слоя  $h = 3$  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 начиналось горение в глубь канала в ячеистом режиме с постепенным увеличением и слиянием ячеек в сплошную фронтальную структуру (см. рис. 8), при этом скорость распространения горения непрерывно росла (рис. 9). Этот эффект объясняется созданием условий для интенсификации естественной конвекции по мере распространения горения вниз по каналу. Скорость распространения сплошного фронта на порядок превышает скорость ячеистого фронта.

## 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 изменением структуры зоны горения, потерей устойчивости волны, скоростью ее 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 приводит 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 установления конвективного переноса,
- слияние ячеек горения и формирование устойчивого сплошного фронта при развитии конвективного переноса газа по мере заполнения канала горячими газообразными продуктами,
- разрушение плоского фронта, формирование неоднородных и ячеистых волновых структур при распространении горения слоя порошка снизу вверх по мере движения фронта.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Озерковская Н. И., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г.** Возникновение пространственных структур в процессе фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 28–36.
2. **Фирсов А. Н., Озерковская Н. И., Шкадинский К. Г.** Нестационарные режимы фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 3–12.
3. **Шкадинский К. Г., Фирсов А. Н., Озерковская Н. И.** Критические явления фильтрационного горения при наличии теплопотерь // Хим. физика. — 2012. — Т. 31, № 1. — С. 48–53.
4. **Костин С. В., Шкадинский К. Г.** Ячеистые режимы фильтрационного горения // Докл. АН. — 2010. — Т. 435, № 2. — С. 182–185.
5. **Костин С. В., Кришеник П. М., Озерковская Н. И., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г.** Ячеистые режимы фильтрационного горения пористого слоя // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 3–13.
6. **Костин С. В., Кришеник П. М., Шкадинский К. Г.** Пульсирующие ячеистые режимы фильтрационного горения пористых сред // Хим. физика. — 2015. — Т. 34, № 5. — С. 58–65.
7. **Костин С. В., Кришеник П. М., Шкадинский К. Г.** Экспериментальное исследование режима неоднородного фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 1. — С. 49–58.
8. **Kostin S. V., Krishenik P. M.** Unsteady infiltration mediated combustion in conditions of regulated quasi isobaric flow of gaseous reagent // Intern. J. Self-Propagat. High-Temp. Synth. — 2013. — V. 22, N 2. — P. 88–92.
9. **Шкадинский К. Г.** Квазиизобарическое приближение в теории горения // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 6. — С. 42–46.
10. **Krishenik P. M., Ozerkovskaya N. I., Firsov A. N., Shkadinsky K. G.** Infiltration-mediated combustion in quasi-2D geometry: Stability of front propagation. Cellular modes of filtration combustion: Phenomenological features // Intern. J. Self-Propagat. High-Temp. Synth. — 2010. — V. 19, N 2. — P. 79–84.
11. **Кришеник П. М., Рогачев С. А., Шкадинский К. Г.** Фильтрационное горение пористого состава в многокомпонентной газовой среде // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 3. — С. 52–61.
12. **Aldushin A. P., Matkowsky B. J., Shult D. A.** Buoyancy driven filtration combustion // Combust. Sci. Technol. — 1997. — V. 125. — P. 283–349.
13. **Aldushin A. P., Matkowsky B. J., Shult D. A.** Upward buoyant filtration combustion // J. Eng. Math. — 1997. — V. 31. — P. 205–234.
14. **Филоненко А. К.** Спиновое горение титана при пониженном давлении // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 6. — С. 41–45.
15. **Алдушин А. П., Сеплярский Б. С., Шкадинский К. Г.** К теории фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 1. — С. 36–45.

*Поступила в редакцию 15/IV 2015 г.,  
в окончательном варианте — 1/XII 2015 г.*

---