

На правах рукописи

ЗАЙЧЕНКО Андрей Юрьевич

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ФРОНТА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ
В НАКЛОННОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ РЕАКТОРЕ**

Специальность 01.04.17 – химическая физика,
в том числе физика горения и взрыва

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Черноголовка – 2009

Работа выполнена в Институте проблем химической физики РАН

Научный руководитель кандидат физико-математических наук
Полианчик Евгений Викторович

Официальные оппоненты доктор технических наук
Холпанов Леонид Петрович

кандидат физико-математических наук
Сеплярский Борис Семенович

Ведущая организация Институт химической физики им. Н.Н.
Семенова РАН (ИХФ РАН)

Защита диссертации состоится «18» февраля 2009 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 002.092.01 при Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН по адресу: 142432, г. Черноголовка Московской обл., ул. Институтская, д. 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Гордополова И.С.

Актуальность темы. Большой интерес представляет организация процесса фильтрационного горения, когда направление распространения тепловой волны совпадает с направлением фильтрующегося газа. В таком процессе реализуется явление сверхадиабатического разогрева. Сверхадиабатический разогрев при фильтрационном горении возникает в результате наличия источника тепла и теплообмена между потоками твердых и газообразных веществ, движущихся навстречу друг другу, в результате чего происходит рекуперация тепла из продуктов горения в зону реакции. Эффект рекуперации тепла может существенно повысить температуру в зоне горения, позволяя использовать в этом случае низкокалорийные топлива либо осуществлять процессы с малым тепловым эффектом (малым тепловыделением). Особый интерес представляет возможность использования фильтрационного горения со сверхадиабатическим разогревом для термической переработки (газификации) различного рода низкокалорийных топлив, в том числе ряда промышленных и бытовых отходов. Преимуществами сверхадиабатического метода термической переработки углеродсодержащих отходов по сравнению с существующими методами являются высокий КПД процесса (до 95%), возможность значительного снижения содержания вредных веществ в газообразных продуктах после дожигания, возможность эффективной переработки некоторых видов отходов, которые не могут быть утилизированы другими способами.

Однако при изучении процессов фильтрационного горения в пористой системе, содержащей твердое горючее и пористый негорючий материал, при вынужденной фильтрации газообразного окислителя в ряде случаев наблюдается возникновение и развитие неустойчивости фронта горения. Одной из причин неустойчивости плоского фронта волны горения является нарушение однородности фильтрации газообразного окислителя, в частности вследствие выгорания горючего из исходной смеси. Неустойчивость может определяться различием фильтрационных свойств исходных веществ и твердых продуктов горения в т.ч. вследствие выделения при пиролизе жидкой фазы, спекания материалов и иных причин. Предельным случаем неустойчивости фронта горения является формирование одного или нескольких «прогаров» (канальное выгорание топлива). Образование и развитие прогаров затрудняет практическую реализацию технологий, основанных на фильтрационном горении в связи с тем, что скорость развития прогара больше, чем скорость распространения фронта горения. Такое различие скоростей приводит к тому, что нарушаются условия газификации, и в установках непрерывного действия это приведет к неравномерному по сечению реактора протеканию процесса и, в конечном счете, аварийной остановке реактора. Поэтому, вопрос о стабилизации фронта горения достаточно актуален.

В современной теории горения не рассматривается движение твердой фазы или рассматривается только движение в направлении перпендикулярном фронту горения. В работе исследуется процесс, в котором осуществлено движение частиц конденсированной фазы в зоне горения в плоскости фронта с достаточно большой скоростью. Практическое осуществление радиального перемешивания частиц твердой фазы в цилиндрическом реакторе в частности может быть

осуществлено каким-либо дополнительным механическим устройством. Этого же можно добиться, расположив реактор под углом к горизонту и приведя его во вращательное движение вокруг своей оси. При этом перемешивание под действием силы тяжести обеспечит как заполнение пустот и каналов, так и равномерное в плоскости сечения реактора распределение раскаленных твердых частиц в зоне горения.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, полученные в течение 2004-2008 гг. в соответствии с координационными планами научно-исследовательских работ ИПХФ РАН в рамках программы Президиума РАН № 7: «Фундаментальные проблемы энергетики», подпрограммы «Биотопливо и энергоносители из возобновляемого сырья». Экспериментальные исследования проводились в лаборатории макрокинетики гетерофазных процессов Института Проблем Химической Физики РАН (зав. лаб. к.ф.-м.н. Е.В. Полианчик).

Цель работы состояла в осуществлении неоднородного движения твердой фазы в реакторе – вдоль оси реактора и радиальное движение, в разработке и создании для этого новой конструкции установки, с наклонным вращающимся реактором позволяющей реализовать процесс стабильного фильтрационного горения, в плотном слое. Исследовать влияние параметров механического воздействия – угла наклона и скорости вращения реактора на характер фильтрационного горения. Изучить газификацию материалов различного фракционного состава. Исследовать масштабный переход от лабораторной установки к пилотной установке.

Задачами работы являлось:

- Изучение процесса фильтрационного горения сопровождаемого неоднородным движением твердой фазы – вдоль оси реактора и в плоскости, перпендикулярной оси (радиальное движение) для чего был разработан новый тип устройства, позволяющий проводить процесс фильтрационного горения в плотном слое – наклонный вращающийся реактор.
- Изучение влияния угла наклона и скорости вращения реактора (т.е. параметров, определяющих характер движения твердой фазы) на параметры зоны горения и нахождение оптимальных значений этих параметров.
- Изучение поведения мелкодисперсных смесей при фильтрационном горении в наклонном вращающемся реакторе.
- Разработка способа введения воды в жидкой фазе непосредственно в реактор для осуществления паровоздушной газификации.
- Изучить возможность масштабирования процессов, с целью переноса их на установки промышленных масштабов.

Научная новизна работы. Впервые с использованием наклонного вращающегося реактора было осуществлено неоднородное движение твердой фазы в реакторе за счет механического перемешивания частиц в зоне горения под действием собственной тяжести. Перемешивания частиц шихты в зоне горения позволяет стабилизировать фронт горения и обеспечить устойчивое протекание процесса в широком диапазоне параметров механического воздействия. Было изучено влияние основных параметров механического воздействия – угла наклона и скорости вращения реактора на характер фильтрационного горения.

Впервые в лабораторных условиях была осуществлена газификация ряда материалов различного химического состава, которые невозможно газифицировать в шахтном реакторе, в том числе мелкодисперсных материалов с низкой газопроницаемостью.

Впервые предложен и разработан способ введения воды в жидкой фазе непосредственно в реактор для осуществления паровоздушной газификации, который позволяет вводить воду в различные зоны волны горения: зону подогрева, окисления, восстановления.

Показана возможность масштабирования процессов, что дает возможность переносить их на установки промышленных масштабов. В экспериментальных исследованиях изучалось увеличение площади сечения реактора в 6 раз, что вполне достаточно для оценки влияния масштаба реактора на характер протекания процессов.

Практическая ценность работы. Осуществление неоднородного течения твердой фазы в наклонном вращающемся реакторе позволяет стабилизировать фронт горения, что дает возможность существенно расширить круг материалов, которые могут быть успешно газифицированы в плотном слое – особенно это актуально для мелкодисперсных материалов с плохой газопроницаемостью. Проведенные исследования являются основой для создания промышленных газификаторов нового типа. Предложенный способ подачи воды в жидкой фазе непосредственно в реактор для осуществления паровоздушной газификации позволяет снизить внешние энергозатраты и дает возможность использовать для парообразования внутрецикловые загрязненные воды.

На защиту выносятся:

1. Способ стабилизации фронта фильтрационного горения за счет управления характером неоднородного течения твердой фазы.
2. Экспериментально установленные зависимости ширины зоны горения от угла наклона и скорости вращения реактора.
3. Экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности использования установки данного типа для газификации мелкодисперсных материалов с плохой газопроницаемостью в определенном диапазоне управляющих параметров.
4. Способ подачи жидкой воды непосредственно в реактор для осуществления паровоздушной газификации.

5. Апробация найденных оптимальных значений управляющих параметров механического воздействия – угла наклона и скорости вращения реактора и способа паровоздушной газификации на пилотной установке и демонстрация возможности масштабирования процессов.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании экспериментальной установки. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, полученные лично автором в течение 2004-2007 гг. в соответствии с координационными планами научно-исследовательских работ ИПХФ РАН в рамках программы Президиума РАН № 7: «Фундаментальные проблемы энергетики», подпрограммы «Биотопливо и энергоносители из возобновляемого сырья». Автор непосредственно участвовал в постановке и обосновании основной части исследований, получении экспериментальных данных их обсуждении и формулировании выводов. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории макрокинетики гетерофазных процессов Института Проблем Химической Физики РАН (зав. лаб. к.ф.-м.н. Е.В. Полианчик).

Апробация работы. Материалы работы докладывались на семинарах отдела Горения и Взрыва ИПХФ РАН, а также на следующих конференциях:

1. Конкурс молодых ученых им. Батурина С.М., Черноголовка, 2007 г.
2. Первая конференция по фильтрационному горению, Черноголовка, 21-24 мая 2007 г.
3. VII конференция им. Воеводского «Физика и химия элементарных процессов», Черноголовка, 24-28 июня 2007 г.
4. XIV симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка, 13-17 октября 2008г.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии и списков рисунков и таблиц. Объем диссертации 93 страниц текста, включая 25 рисунков, 7 таблиц и библиографию из 104 наименований.

Краткое содержание основных глав

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы, описана структура диссертации, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведена общая характеристика фильтрационного горения твердого топлива и приведена классификация волн горения (нормальная, переходная и инверсная волна горения), реализующихся в зависимости от соотношения топлива и инертного компонентов. Описано явление сверхадиабатического разогрева в фильтрационном горении. Сделан обзор существующих на данный момент технологий термической переработки углеродсодержащих материалов, обсуждены достоинства и недостатки этих технологий. Показано, что газификация является наиболее эффективным способом термической переработки твердых топлив. Проведена классификация технологий газификации. Показано, что газификация твердых топлив (в том числе твердых отходов) в режиме сверхадиабатического разогрева является одним из лучших с экологической и практической точки зрения. Описаны причины ограничения данного метода (за счет возникновения и развития газодинамической неустойчивости фронта горения) при практической реализации и возможные причины их возникновения. Описаны существующие на данный момент пути решения данной проблемы. И показано, что данные решения не являются удовлетворительными.

Во **второй главе** обсуждается возможное влияние на процесс фильтрационного горения неоднородного движения твердой фазы – перемещение частиц твердой фазы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях – вдоль оси реактора и радиальное перемещение. Предлагается способ осуществления такого движения твердой фазы в реакторе за счет механического перемешивания материала в реакторе, используя наклонный реактор, приводящийся во вращательное движение вокруг продольной оси, что обеспечивает перемешивание материала в зоне горения. Приводится сравнение течения твердого материала в вертикальном и наклонном вращающемся реакторах, на основании численного моделирования. Показано, что во вращающемся наклонном реакторе течение в объеме более свободное и практически однородно по радиусу.

В работе предложен один из методов стабилизации фронта горения, который осуществляется за счет создания неоднородного движения конденсированной фазы в наклонном вращающемся реакторе. Наклонное положение реактора провоцирует развитие прогара вдоль верхней образующей реактора (вследствие образования зоны с менее плотной упаковкой материала). А вращение реактора обеспечивает радиальное движение частиц,

способствующее как заполнению пустот и каналов, так и равномерному перераспределению раскаленных твердых частиц горючего в плоскости сечения реактора.

В третьей главе описаны экспериментальные установки, на которых проводились исследования (рис.1). Основные узлы для установок с реакторами различных диаметров конструктивно одинаковы (отличаются только практическим исполнением), поэтому подобное описание сделано для установки с реактором диаметра 66 мм.



Рис. 1 Экспериментальные установки с диаметром реактора 66 мм (слева) и 160 мм (справа).

Также в этом разделе описаны материалы, на которых проводились экспериментальные исследования. В работе в качестве исследуемого объекта была выбрана смесь твердого горючего с инертным компонентом (балластный теплоноситель). В качестве горючего использовался древесный уголь (березовый, марки А, ГОСТ 7657-84) различного фракционного состава: 2 – 3, 3 – 5, 5 – 7 и 7 – 12 мм, а также древесные опилки фракционного состава 3 – 5 мм. Древесный уголь использовался в экспериментах как простейшее модельное горючее, состоящее не менее чем на 92 % из чистого углерода, максимально свободный от различных примесей и добавок, с известной теплотворной способностью, равной 30,14 МДж/кг. Древесные опилки использовались для апробации предложенного способа стабилизации фронта горения на материале подверженном выделению большого количества жидких продуктов (при нагревании), которые ухудшают проницаемость шихты и способствуют слипанию частиц материала между собой и стенками реактора, что затрудняет их газификацию. В качестве инертного компонента использовался дробленый шамотный кирпич (марки ШЛ-1,3) фракционного состава 3 – 5, 5 – 7 и 12 – 17

мм. Удельный расход газообразного окислителя и доля горючего в шихте были постоянными. Расход газообразного окислителя (среднеобъемная скорость) составлял 0,19 м/с, а доля горючего в шихте составляла 30% по массе. Для более полной характеристики используемых составов были проведены измерения коэффициентов проницаемости.

В качестве основного параметра, характеризующего однородность протекания процесса, принималась ширина светящейся зоны, где температура превышала 700°C (рис. 2). Температуру в зоне горения измеряли оптическим пирометром марки С-700. Ширина светящейся зоны определяется совокупностью ряда процессов, протекающих в реакторе: теплотерями через стенки реактора (излучением и конвективными), тепло- и массообменом между потоками твердой фазы и газа, химической реакции окисления частиц горючего, движения частиц твердой фазы под воздействием силы тяжести и вращения реактора. Поэтому наблюдаемая ширина высокотемпературной зоны в свою очередь определяется многими параметрами: временем, сгорания частиц угля которое определяется в т.ч. линейными размерами частиц; характеристиками теплотерь через стенку реактора зависящих от диаметра реактора; расходом газообразного окислителя и долей горючего в шихте. В условиях эксперимента, при высоком уровне излучательных теплотерь, светящаяся зона практически совпадает с зоной интенсивного окисления углерода, в которой визуально наблюдаются горящие частицы топлива. Определение мгновенной ширины светящейся зоны проводилось по результатам обработки кадров видеосъемки эксперимента. На каждый оборот реактора выбирались по два кадра, отображающие противоположные части реактора. На каждом кадре производилось измерение ширины зоны горения не менее чем в 10 сечениях. Ширина светящейся зоны определялась как усредненная для всего времени эксперимента после выхода фронта горения на стационарный режим – волна горения распространяется практически с постоянной скоростью. Наблюдаемый разброс значений ширины светящейся зоны в экспериментах не превышал 10 % от среднего.



Рис. 2 Ширина зоны горения.

Ниже ширина зоны горения выражена в относительных единицах, за единицу принят внутренний диаметр реактора.

Традиционная схема паровоздушной газификации предполагает наличие внешнего парогенерирующего устройства, где происходит испарение воды. Далее водяной пар смешивается с кислородсодержащим газообразным окислителем и подается в нижнюю часть реактора. В нашем случае

паровоздушная газификация осуществлялась путем подачи воды непосредственно в реактор в высокотемпературную зону.

Реализация в шахтном реакторе такого способа подачи воды затруднительна. В результате точечной подачи воды происходит локальное охлаждение горячего материала поступающей водой. В наклонном вращающемся реакторе эта проблема решается за счет радиального движения частиц материала и, следовательно, перераспределения, охлаждающихся водой частиц, в плоскости реактора, перпендикулярной оси.

Подача воды в реактор осуществлялась через трубку, выполненной из нержавеющей стали, диаметром 5 мм через нижний торец реактора в область, прилегающую к оси реактора. При этом вода подается в область, где температура близка к максимальной. Это обеспечивает наиболее благоприятные условия для равномерного образования водяного пара. Положение трубки в реакторе можно было регулировать по длине реактора, подбирая необходимое ее положение относительно фронта горения. Общая схема подачи воды реактор представлена на рис. 3.

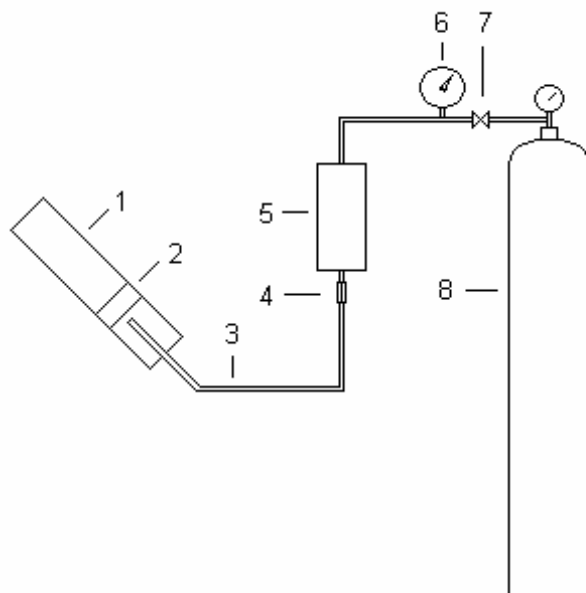


Рис. 3 Общая схема подачи воды в реактор. 1 – реактор, 2 – зона горения, 3 – трубка для подачи воды, 4 – капилляр, 5 – баллон с водой, 6 – манометр, 7 – вентиль, 8 – баллон с азотом.

Четвертая глава. При изучении процессов фильтрационного горения наблюдается явление образования и развития неустойчивости плоского фронта горения. Предельным случаем неустойчивости фронта горения является формирование одного или нескольких «прогаров» (канальное выгорание топлива). В вертикальном реакторе наиболее вероятное место развития прогара является пристеночная область, где происходит увеличение скорости газового потока за счет меньшего сопротивления столба сыпучих материалов.

Поскольку в наклонном реакторе стабилизация фронта горения достигается вследствие баланса двух разнонаправленных процессов – развития прогара,

спровоцированного меньшей плотностью засыпки вдоль верхней образующей реактора и перемешивания твердой фазы при вращении, предварительно было исследовано влияние угла наклона на скорость развития прогара в неподвижном реакторе. Исходным состоянием для развивающегося прогара было состояние плоского стабилизированного фронта горения, предварительно сформированного при вращении реактора. Развитие прогара регистрировалось после остановки реактора. Под скоростью развития прогара понимается линейная скорость сгорания шихты (распространения высокотемпературной зоны) по верхней образующей реактора за вычетом скорости распространения фронта горения как целого. При уменьшении угла наклона происходит увеличение скорости развития прогара (рис. 4) вследствие образования зоны с менее плотной упаковкой материала по верхней образующей реактора, что приводит к относительному увеличению скорости потока окислителя в этой зоне. Для составов, содержащих более мелкую фракцию горючего (2-3 мм), обладающих меньшей исходной газопроницаемостью, скорость развития прогара выше.

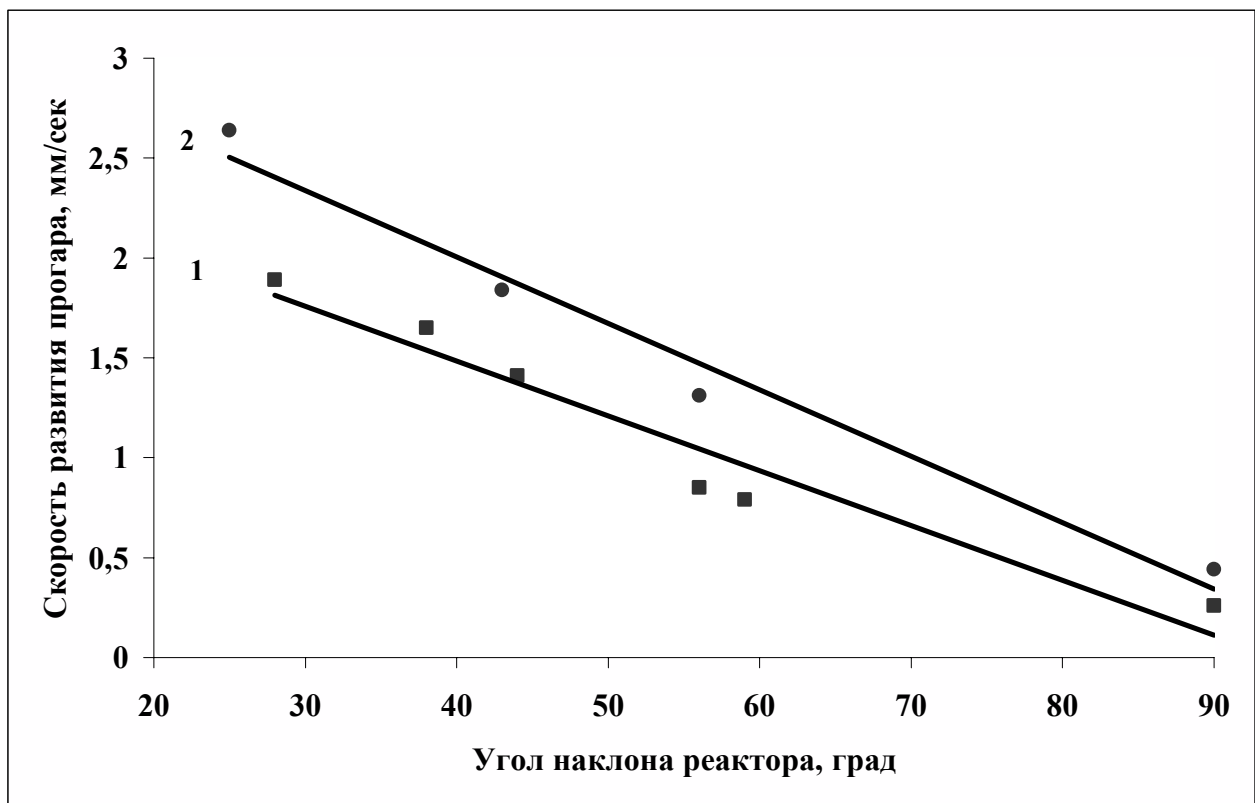


Рис. 4 Зависимость скорости развития прогара от угла наклона реактора в стационарном положении для угля фракционного состава 3-5 мм (1) и 2-3 мм (2).

Как показывают экспериментальные наблюдения, чтобы подавить прогар сопоставимый по размерам с зоной горения необходимо совершить минимум один оборот реактора (рис. 5). Зная скорость развития прогара можно оценить минимальную скорость вращения реактора, необходимую для подавления прогара для каждого угла наклона реактора. Кроме того, чтобы определить минимальную скорость вращения реактора необходимо знать зависимость ширины зоны горения от угла наклона реактора.



Рис. 5 Подавление прогара: а) Начальное состояние прогара в момент возобновления вращения; б) через 1 сек; в) через 6 сек (1 оборот).

Зависимость отношения ширины зоны горения к диаметру реактора от угла наклона реактора при скорости вращения реактора в 16 об/мин для различных составов шихты приведена на рис. 6. Выбранная скорость вращения (16 об/мин) позволяет в настоящих условиях заведомо подавлять неустойчивость фронта горения.

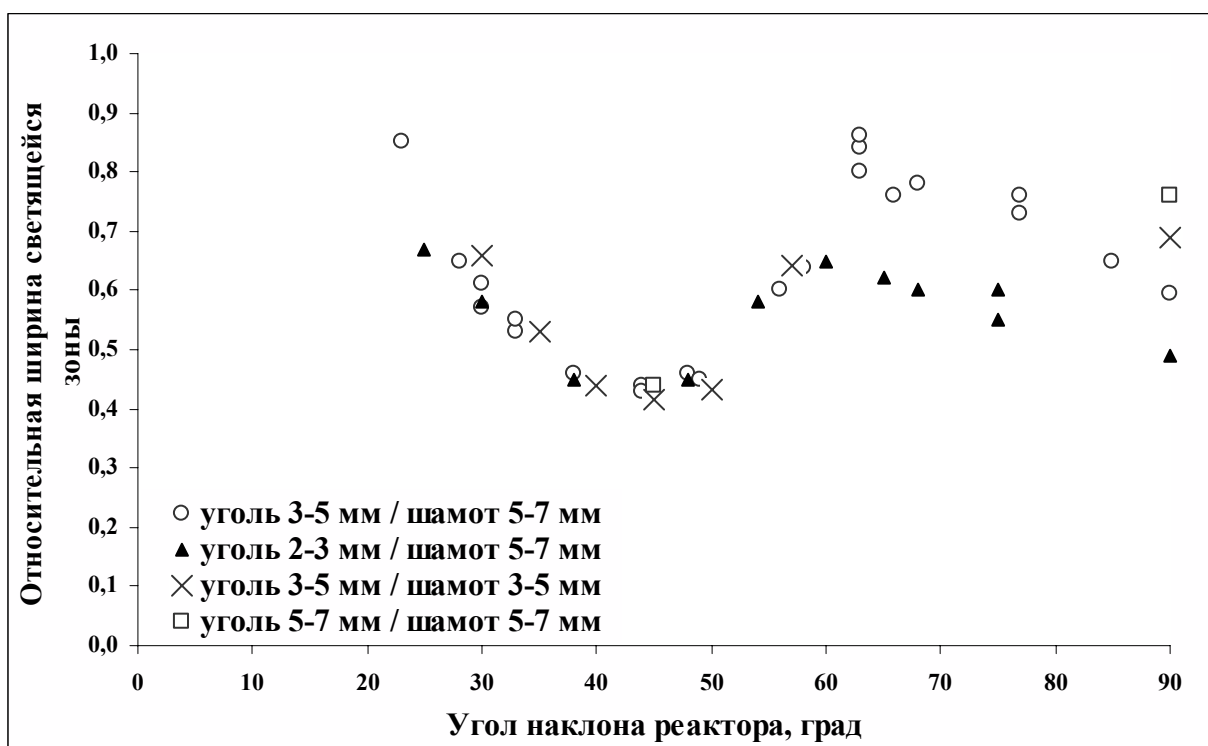


Рис. 6 Зависимость относительной ширины зоны горения от угла наклона реактора для различных составов.

Для сравнения проводились также эксперименты по горению исследуемой модельной системы древесный уголь – инертный материал в вертикальном цилиндрическом реакторе. Эксперименты проводили в периодическом режиме, без выгрузки твердых продуктов горения. Фронт горения при этом распространялся по загруженной шихте снизу вверх. Для всех исследованных составов в вертикальном шахтном реакторе, как правило, наблюдается образование прогара, и плоский фронт горения воспроизводится не в каждом эксперименте. В тех случаях, когда наблюдался плоский фронт горения, его ширина составляла 0,5 – 0,7 диаметра реактора, что больше чем в диапазоне

углов наклона реактора ($40 - 50^\circ$), где ширина светящейся зоны равна $\sim 0,4$ диаметра реактора.

Сравнение экспериментальных данных (рис. 5) показывает, что наблюдается ярко выраженная зависимость ширины светящейся зоны от угла наклона, что указывает на сильное влияние перемешивания твердой фазы. В области углов наклона реактора $30 - 65^\circ$ зависимости относительной ширины светящейся зоны для различных составов совпадают в пределах точности эксперимента, в этом случае преобладающим фактором, определяющим ширину светящейся зоны, является именно характеристика перемешивания.

Измеренные зависимости скорости развития прогара и ширины зоны горения от угла наклона реактора позволяют оценить скорость вращения реактора для каждого угла наклона, необходимую для предотвращения развития прогара.

Для подавления растущего прогара период обращения реактора должен быть не более чем время, необходимое для развития прогара на ширину зоны горения:

$$t = \frac{H}{v},$$

где H – ширина зоны горения (мм); v – скорость развития прогара (мм/сек). Оценка на основе вышеприведенных данных (см. рис. 4) минимальной скорости вращения реактора показывает, что для исследуемых составов достаточно ~ 5 об/мин для стабильной работы установки данного типа в широком диапазоне углов наклона.

Чтобы исследовать влияние скорости вращения реактора на ширину светящейся зоны в области лежащей за пределами минимально необходимой (5 об/мин) были проведены экспериментальные исследования в широком диапазоне скоростей вращения (6 – 30 об/мин) при угле наклона реактора $\sim 45^\circ$ для состава содержащего уголь 3-5 мм и инертный материал 5-7 мм. Ширина зоны горения от скорости вращения реактора для исследуемого материала практически не зависит (рис. 7). Следовательно, в практических приложениях скорость вращения реактора можно использовать, например, для регулирования интенсивности разгрузки реактора при определенной конструкции разгрузочного устройства, чтобы контролировать положение фронта горения по длине реактора.



Рис. 7 Влияние скорости вращения реактора на ширину светящейся зоны.

В экспериментах в наклонном вращающемся реакторе визуально наблюдался стабильный плоский фронт горения, однако само по себе это не гарантирует сохранения условий равномерного по сечению реактора горения (газификации) твердого топлива. В качестве индикатора равномерности протекания горения в слое можно рассматривать состав газообразных продуктов газификации. С этой целью было проведено сравнение состава продукт-газа, образующегося при газификации древесного угля в вертикальном и наклонном вращающемся реакторах.

В таблице 1 приведены сравнительные данные анализа компонентного состава продукт-газа, полученного при воздушной газификации смесей угля (30%) с инертным компонентом (70%) в наклонном и вертикальном реакторах диаметра 66 мм, при расходе газообразного окислителя равном 0,19 м/с. Для вертикального реактора отбор продуктов газификации проводился для реализации, когда не происходило образования прогара. Скорость вращения реактора составляла 12 об/мин. Как видно из таблицы, состав газообразных продуктов, полученных в наклонном и вертикальном реакторах, близок. Таким образом, в наклонном вращающемся реакторе реализуются условия газификации, аналогичные условиям газификации в вертикальном реакторе.

Таблица 1. Сравнительные данные анализа компонентного состава продукт-газа, полученного при воздушной газификации угля в наклонном и вертикальном реакторах диаметра 66 мм.

Угол наклона реактора, град	Содержание компонентов в продукт-газе, %		
	СО	СО ₂	Н ₂
90	20,00 – 21,46	5,87 – 6,23	4,02 – 4,52
68	20,19 – 22,40	6,20 – 7,15	5,00 – 5,20
58	20,87 – 23,38	5,42 – 7,10	4,76 – 5,62
45	17,40 – 18,90	6,20 – 7,30	3,70 – 6,10
30	20,20 – 23,63	4,53 – 7,07	3,26 – 6,40

Для энергетического использования различного рода горючих отходов и низкосортных топлив с максимальным КПД целесообразно вводить в состав газообразного окислителя водяной пар и/или углекислый газ, которые при температурах выше 800°С вступают в эндотермические реакции с углеродом, что повышает содержание горючих компонентов (водорода и монооксида углерода) в газообразных продуктах. Также наличие пара в составе газообразного окислителя позволяет контролировать тепловой режим процесса, уходя из области критических температур 1300 – 1500°.

В данной работе предлагается вводить воду в реактор-газификатор путем подачи ее в зону горения, где происходит ее испарение. Вода в реактор подается отдельно от газообразного окислителя (кислорода/воздуха) через трубку, выполненную из термостойкого сплава. Наклонное положение реактора и его вращательное движение способствует перемешиванию частиц материала, что создает дополнительные условия для равномерного распределения пара по сечению реактора. Такая организация процесса позволяет использовать загрязненную воду, которая само по себе является объектом многих технологических методов утилизации. Еще одним преимуществом подачи воды в зону горения является снижение затрат на оборудование для парообразования.

По результатам ряда экспериментов были сделаны масс-спектрометрические анализы продукт-газа (таблица 2). Как видно, содержание СО и Н₂ в продуктах газификации, полученных в наклонном вращающемся реакторе такое же как и в вертикальном реакторе при традиционной схеме паровоздушной газификации. Таким образом, можно утверждать, что радиальное движение твердой фазы способствует перераспределению частиц в плоскости сечения реактора, что обеспечивает равномерное испарение воды, и распределение пара в реакторе.

Таблица 2. Сравнительные данные анализа компонентного состава продукт-газа, полученного при паровоздушной газификации угля в наклонном и вертикальном реакторах диаметра 66 мм.

Вид реактора	Содержание в продукт-газе, %	
	СО	H ₂
наклонный	17 – 19	10 – 14
вертикальный	18 – 20	11 – 14

Важным аспектом экспериментальной работы является возможность практической реализации обсуждаемого способа стабилизации фронта горения в промышленных масштабах и переносимость результатов на реакторы больших размеров. Для этого были проведены эксперименты по газификации древесного угля в реакторе внутреннего диаметра 160 мм. При переходе от реактора диаметром 66 мм к реактору диаметру 160 мм линейные размеры частиц шихты были изменены пропорционально изменению габаритов реакторов.

Ширина светящейся зоны в реакторе внутреннего диаметра 160 мм для нескольких углов наклона – 30, 40 50° представлены на рис. 8 Скорости вращения и расход газообразного окислителя были теми же, что и для реактора диаметром 66 мм: 16 об/мин и 0,19 м/сек, соответственно. Как видно, в диапазоне углов наклона реактора, обеспечивающих оптимальное перемешивание шихты относительная ширина светящейся зоны для обоих реакторов совпадает. По-видимому, это свидетельствует, что в исследованных условиях основным фактором, в этом диапазоне углов наклона определяющим ширину светящейся зоны, являются теплотери, зависящие от диаметра ректора и условий перемешивания шихты в высокотемпературной зоне.

Для осуществления паровоздушной газификации в реакторе внутреннего диаметра 160 мм использовался метод подачи жидкой воды непосредственно в зону горения описанный выше. Сравнительные результаты масс-спектрометрического анализа продукт-газа по горючим компонентам для реакторов различных диаметров приведены в таблице 3. Эксперименты проводились при идентичных условиях.

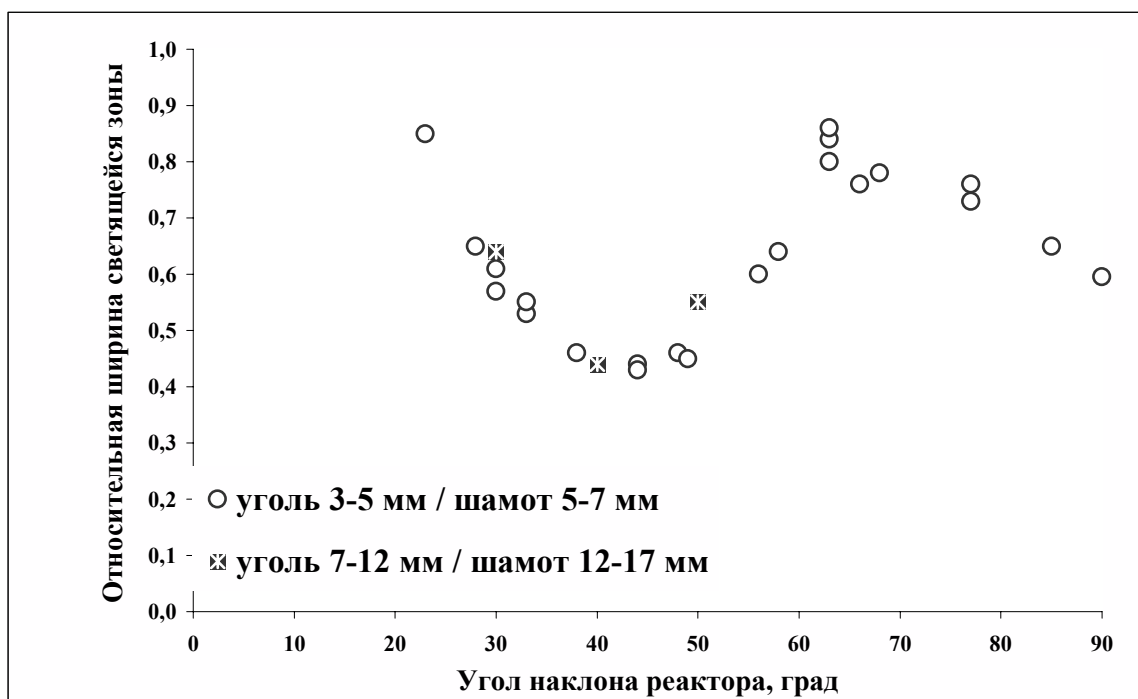


Рис. 8 Зависимость относительной ширины зоны горения от угла наклона реактора для различных составов и диаметров реактора (для угля 3-5 мм / шамота 5-7мм диаметр реактора – 66 мм, для угля 3-5 мм / шамота 5-7мм – 160 мм).

Таблица 3. Сравнительные результаты масс-спектрометрического анализа продукт-газа, полученного при паровоздушной газификации угля в реакторах различных диаметров.

Диаметр реактора, мм	Расход газообразного окислителя, м/с	Мольное соотношение H_2O/O_2	Содержание в продукт-газе, %	
			CO	H_2
66	0,19	1	17 – 19	10 – 14
160	0,19	1	18 – 20	12 – 15

Как видно из таблицы 3 при увеличении масштаба реактора метод подачи воды в реактор для паровоздушной газификации успешно работает и можно рассчитывать, что и при переходе к промышленным масштабам данный способ можно успешно реализовать.

Важным аспектом лабораторных исследований было осуществление газификации ряда материалов, которые затруднительно газифицировать в шахтном реакторе – мелкодисперсные с плохой газопроницаемостью, в том числе древесные опилки, мелкий уголь, отходы нефтеперерабатывающей промышленности, модельный состав твердых бытовых отходов (ТБО). Эксперименты проводились при угле наклона реактор $\sim 45^\circ$ и скорости вращения реактора 12 об/мин. На рис. 9 представлен фронт горения различных

материалов: а – мелкодисперсный уголь; б – древесные опилки; в – модельный состав, отходов нефтеперерабатывающей промышленности; г – модельный состав ТБО. Как видно, при газификации перечисленных материалов в зоне горения сохраняется перемешивание материала конденсированной фазы, что позволяет стабилизировать фронт горения.



а



б



в



г

Рис. 9 Фронт горения при газификации различных материалов.

Изучение влияния двумерного движения конденсированной фазы в высокотемпературной зоне химической реакции при газификации древесных опилок представляет особый практический интерес. Однако термическая переработка древесных отходов затруднена вследствие плохой газопроницаемости и выделения при нагреве большого количества смол.

При использовании наклонного, вращающегося реактора удалось получить стабильный фронт горения даже для такого проблемного материала как древесные опилки.

На рис. 10 представлена зависимость ширины зоны горения от угла наклона реактора. Как и в случае древесного угля для древесных опилок ширина зоны горения в интервале углов $40 - 50^\circ$ равна $\sim 0,5$ диаметра реактора. Отличия наблюдаются при малых и при больших углах наклона, и в среднем для древесных опилок зона горения шире на $20 - 30\%$ чем для древесного угля. Более ярко выраженная зависимость в случае древесных опилок может объясняться, например, более сложным химическим составом, а также наличием

одновременно протекающих процессов пиролиза древесины и газификации углеродного остатка.

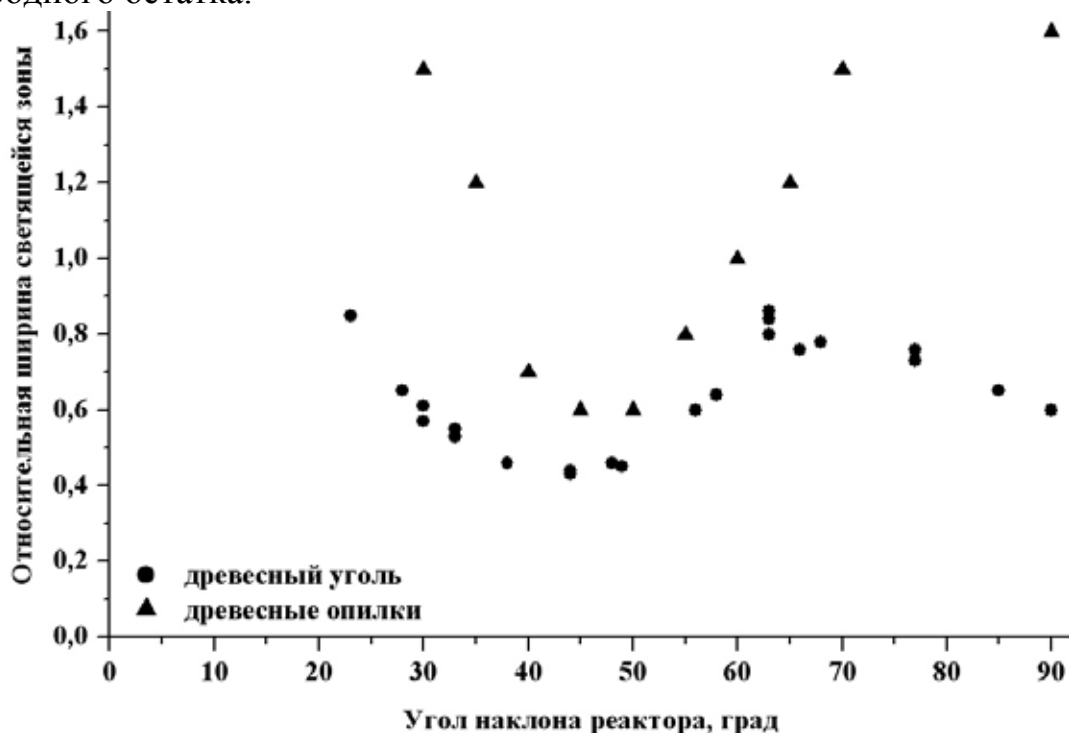


Рис. 10 Зависимость ширины светящейся зоны от угла наклона при газификации различных материалов.

На рис. 11 представлена зависимость ширины зоны горения от скорости вращения реактора при угле наклона $\sim 45^\circ$. Как видно из графика, в отличие от древесного угля наблюдается ярко выраженная зависимость ширины светящейся зоны от скорости вращения. Это, как и в случае зависимости ширины светящейся зоны от угла наклона реактора, может быть обусловлено особенностями механическими поведения древесины при пиролизе и газификации.

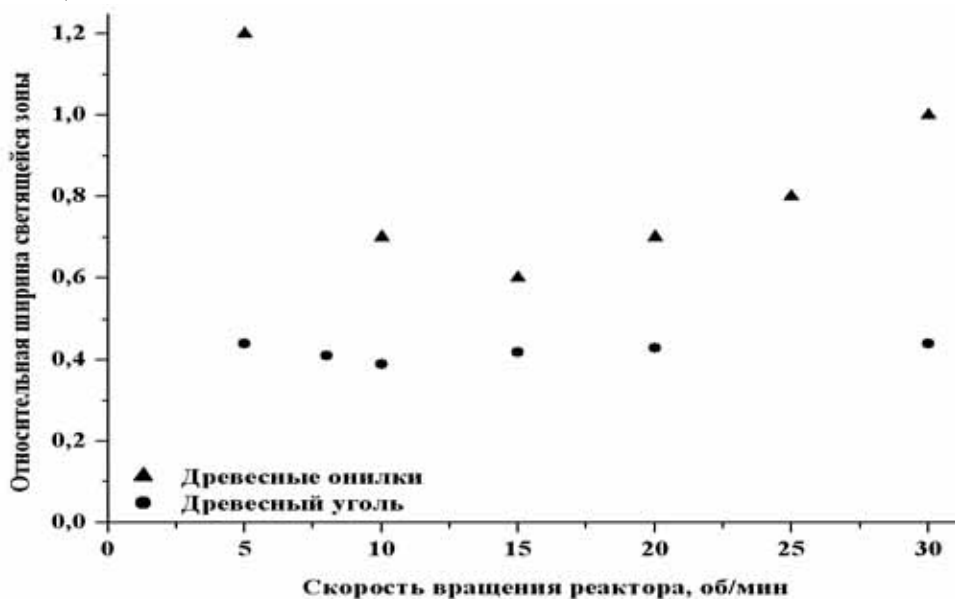


Рис. 11 Зависимость ширины светящейся зоны от скорости вращения реактора при газификации различных материалов.

Однако, несмотря на различия зоны горения для древесного угля и древесных опилок стоит отметить, что в области углов наклона реактора 40-50° и скорости вращения 10-20 об/мин для обоих случаев наблюдается ярко выраженный минимум. И процесс газификации протекает стабильно в этих диапазонах значений параметров механического воздействия даже для такого проблемного материала как древесные опилки.

Выводы:

1. Показано, что осуществление процесса фильтрационного горения в наклонном вращающемся реакторе обеспечивает стабилизацию фронта фильтрационного горения для топливных составов, для которых плоский фронт горения в вертикальном реакторе неустойчив.
2. Исследовано влияние угла наклона и скорости вращения реактора на ширину зоны горения и найдены оптимальные параметры, при которых реализуется минимальная ширина фронта горения.
3. Показано, что на установках данного типа можно успешно проводить термическую переработку материалов различной природы в том числе спекающихся, мелкодисперсных с плохой газопроницаемостью, что в реакторах шахтного типа осуществить затруднительно или невозможно.
4. Осуществлен способ подачи воды в реактор для паровоздушной газификации.
5. Показана возможность масштабирования процессов, что дает возможность переносить их на установки промышленных масштабов.
6. Разработанный тип газификаторов может служить основой для создания семейства промышленных устройств, позволяющих газифицировать ряд разного рода проблемных топлив.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зайченко А.Ю., Жирнов А.А., Манелис Г.Б., Полианчик Е.В., Жолудев А.Ф. Стабилизация фронта фильтрационного горения // Доклады Академии Наук. 2008. Т.418, №5. С. 635-637.
2. Дорофеенко С.О., Зайченко А.Ю., Жирнов А.А. Манелис Г.Б., Полианчик Е.В., Черемисин В.В., «Способ переработки конденсированных горючих путем газификации и устройство для его осуществления». Патент РФ №2322641, приоритет от 02.05.2006.
3. Зайченко А.Ю., Жирнов А.А., Манелис Г.Б., Полианчик Е.В., Жолудев А.Ф. Исследование фильтрационного горения в наклонном вращающемся реакторе: возможности практического применения. Тез. XIV симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка, 13-17 октября 2008г.