

02.00.04

К 891



На правах рукописи

Кузнецов Геннадий Федорович

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ГАЗИФИКАЦИИ И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

Специальность 02.00.04 – «Физическая химия»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Челябинск

Издательство ЮУрГУ

2002

Работа выполнена на кафедрах промышленной теплоэнергетики и общей физики Южно-Уральского государственного университета.

Научные консультанты:

доктор технических наук, профессор Гуревич С.Ю.,
доктор технических наук, профессор Торопов Е.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Холпанов Л.П.,
доктор технических наук, профессор Берг Б.В.,
доктор технических наук, профессор Ставров А.П.

Ведущая организация – УралВТИ (г. Челябинск).

Защита состоится 19 февраля 2003 г., в 14⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д212.298.04 при Южно-Уральском государственном университете.

Адрес: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет университета, тел. 67-91-23, факс 67-97-44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан « 14 » января 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физ.-мат. наук



Б.Р. Гельчинский

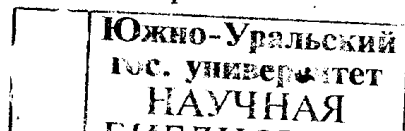
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы. Применяемые способы сжигания твердого топлива в нашей стране связаны с загрязнением окружающей среды, сложностью эксплуатации оборудования тепловых электростанций и его остановами и возникающими в связи с этим экономическими потерями и другими проблемами хозяйственной жизни общества. Страны, обладающие достаточным экономическим потенциалом для решения энергетическим проблем и разработки новых экономически и экологически совершенных способов сжигания твердого топлива, полностью реконструируют или строят новые тепловые электрические станции. В условиях недостатка средств на полное перевооружение энергетики целесообразна частичная реконструкция оборудования с использованием основных фондов и получением положительного эффекта.

Одним из современных способов улучшения показателей энергетики является сжигание твердого топлива с его предварительной газификацией, которое позволяет снизить выбросы оксидов серы и азота с уходящими газами, основную часть золы отделить в сухом виде и в дальнейшем использовать ее в качестве сырья для производства стройматериалов.

Однако на пути реализации рассматриваемого способа стоят трудности, связанных с малой изученностью процессов газогенерации, в особенности для конкретного вида топлива. Внедрение дополнительного комплекса оборудования, связанного с газогенератором, кроме трудностей его компоновки в условиях действующей ТЭС, приносит трудности согласования совместной работы основного и вспомогательного оборудования. Основные трудности состоят в организации эффективного процесса генерации газа, устойчивого против шлакования, протекающего стабильно и надежно в достаточно простом устройстве, вписывающемся в систему действующего оборудования.

Целью работы является совершенствование процесса генерации газа из твердого топлива для последующего его сжигания в котлах существующих ТЭС и реализация оптимального сочетания последовательности различных элементов технологии.



Научная новизна работы:

- впервые на основе разработанных теоретических положений и экспериментальных исследований показана возможность и целесообразность двухступенчатой воздушной газификации с использованием высоко- и низкоскоростной ступеней;
- выявлены закономерности воздушной газификации в кипящем слое (на примере челябинского бурого угля), получена зависимость выхода золы определенной фракции и пористости, уноса мелких частиц из слоя и содержания NO_x в газах генерации от фракционного состава угля, коэффициента избытка воздуха, скорости газового потока, влажности угля;
- впервые разработана, смонтирована и опробована на действующей ТЭС новая система сжигания с предварительной газификацией твердого топлива и дожиганием на действующем котле; для поддержания постоянных гидродинамических параметров и ограничения максимальной температуры слоя на переходных режимах применена добавка инертных (дымовых) газов;
- впервые сформулирована и решена задача устойчивости псевдооживленного слоя в нелинейной постановке; показано, что в результате неустойчивости возникают вихревые циркуляционные течения, образование которых подтверждено экспериментально;
- получено и подтверждено экспериментально распределение частиц псевдооживленного слоя по высоте, решены задачи о движении частиц в подвижном слое с учетом действующих на них сил;
- получены соотношения, связывающие теплоперенос и распределение температуры в кипящем слое;
- учтена неоднородность при параметрической идентификации неизвестных величин модели кипящего слоя;
- выявлен механизм влияния скорости газового потока при газификации твердого топлива на характеристики газогенератора, что позволило идентифицировать основные элементы моделей вихревой скоростной камеры;
- получена зависимость плотности распределения частиц в вихревой камере от радиальной координаты и экспериментально показана ее связь с вероятно-

стью начала шлакования при повышенных температурах, определены режимы надежного функционирования камеры;

– на основе микро- и макроанализа показано, что соединение вихревой камеры и дожигающей части газогенератора на основе кипящего слоя дает оптимальное устройство в системе сжигания твердого топлива, позволяющее учитывать не только условия действующей ТЭС, но и характеристики сжигаемого топлива.

Достоверность и обоснованность основных выводов подтверждается тем, что научные результаты, полученные в работе, лежат в рамках фундаментальных физико-химических представлений о процессах в дисперсных системах; согласованием экспериментальных и теоретических результатов, сопоставлением с результатами других авторов. Экспериментальная проверка теоретических выводов проводилась на стендах и специальных установках ЮУрГУ, Казахского научно-исследовательского института энергетики, УралВТИ и Киевского института энергосбережения на пилотных установках и опытно-промышленном образце на Челябинской ТЭЦ-2; в лабораторных условиях применялись специальные высокоточные приборы, такие как масс-спектрограф, дериватограф, ртутный поромер, так и стандартные приборы. Все использованное для исследований оборудование подвергалось систематической метрологической проверке в организациях, где проводились исследования.

Автор защищает:

- теоретические и экспериментальные результаты исследования гидродинамики кипящего слоя;
- результаты экспериментальных исследований газификации угольных частиц в воздушном потоке, зависимость ее параметров от входных условий;
- результаты комплексных исследований и совершенствования химико-физических характеристик процесса газификации угольных частиц;
- способ и устройство с оптимальным сочетанием технологических элементов для системы сжигания твердого топлива на ТЭС.

Личный вклад автора:

- определение направления теоретического решения и практического совершенствования технологии газификации твердого топлива;
- постановка исследований газификации в псевдооживленном слое и теоретическое и экспериментальное решение химико-физических задач;
- реализация схемных решений устройства с газогенератором, дожигателем и охладителем и всем необходимым вспомогательным оборудованием для системы сжигания твердого топлива;
- проведение экспериментальных работ и пробных испытаний опытно-промышленного образца;
- анализ и обобщение результатов реконструкции газогенератора и разработка направления совершенствования процесса газификации;
- разработка моделей элементов процесса и их теоретическое и экспериментальное исследование;
- реконструкция усовершенствованного газификатора с вихревой камерой на основе теоретических выводов и экспериментальных данных и его реализация на действующем оборудовании ТЭС.

Практическая ценность заключается в следующем:

- на примере опытно-промышленного образца газогенератора для системы сжигания топлива в топках котлов на ТЭС показано направление повышения их экономических и экологических характеристик;
- определен диапазон технически и экономически выгодных режимов воздушной газификации в кипящем слое;
- получены теоретические и экспериментальные зависимости, которые позволяют оптимизировать процесс газификации угольных частиц для повышения надежности системы сжигания и получения золы нужного качества;
- разработаны модели и получены теоретические соотношения, по которым можно определить критические параметры расслоения по размерам псевдооживленного слоя, его тепловые свойства, позволяющие повысить устойчивость против спекообразования;

- разработан эффективный способ регулирования параметров процесса газогенерации с применением инертных (дымовых) газов и сохранением постоянной скорости дугтя газо-воздушной смеси;
- разработанный метод газификации частиц твердого топлива в вихревой камере можно использовать не только в энергетике, но и в смежных отраслях промышленности;
- первоначальный вариант газификации дробленого угля с последующим ее дожиганием в топке действующего котла БКЗ–210–140Ф опробован в качестве опытно-промышленного образца на ЧТЭЦ-2;
- последующее совершенствование и модернизация опытно-промышленного образца до уровня действующего оборудования произведено там же.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на Минском международном форуме по тепло- и массообмену (ММФ) 1996 г., 2000 г., международной школе-семинаре «Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива», г. Минск 1988 г.; Всесоюзном симпозиуме «Проблемы газификации углей», г. Красноярск 1991 г.; Международном симпозиуме по горению и взрыву «Химическая физика процесса горения и взрыва», г. Суздаль 1989 г., г. Черноголовка 1992 и 1996 гг.; на семинаре «Твердотопливные энергетические технологии», г. Киев 1992 г.; на конференции ЧГТУ «Совершенствование существующих тепловых схем и технологических процессов промышленных ТЭС и энерготехнологических агрегатов», г. Челябинск 1994 г.; Всесоюзной конференции «Сжигание твердых топлив», г. Новосибирск 1986 г.; Всесоюзной конференции «Трубопроводный гидротранспорт твердых материалов», г. Москва 1986 г.; Всесоюзной конференции «Кипящий слой», г. Свердловск, УПИ 1986 г.; на II Всесоюзной конференции «Теплообмен в парогенераторах», г. Новосибирск 1990 г.; на Всесоюзной конференции «Научные основы энергосберегающей техники и технологий», г. Москва, МЭИ 1990 г.; Всесоюзном симпозиуме по энергосбережению, г. Иркутск 1992 г.; республиканской конференции ЮУрГУ, г. Челябинск 1999 г.; на межвузовской конфе-

ренции «Математическое моделирование и краевые задачи», г. Самара, ГТУ 2000 г.; Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и природосбережения в энергетике», г. Харьков 1994 г. Основное содержание диссертации было доложено и получено одобрение на ведущем предприятии УралВТИ, и на объединенном научном семинаре Д212.298.04 по специальности 02.00.04 «Физическая химия» ЮУрГУ, и на заседании кафедры физики.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 63 работы, в том числе 3 монографии, 22 авторских свидетельства и патента.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка цитируемой литературы из 127 наименований и приложений. Работа изложена на 228 страницах, включая 45 рисунков, 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации проанализировано состояние энергетики и направление развития ее технологий, особенно в применении к твердым топливам. Показано, что одним из наиболее перспективных направлений при сжигании твердых топлив является использование их предварительной газификации. Применение на ТЭС газогенераторов совместно с существующим оборудованием без больших капитальных затрат дает возможность разделить весь процесс сжигания углей на части, причем, после первой его части, газификации, основную часть золы исключить из технологии, тем самым облегчить работу вспомогательного котельного оборудования и существенно снизить выбросы летучей золы с отходящими газами. Дожигание газов генерации в существующих котлах дает значительное снижение выбросов окислов азота и серы с уходящими газами, по сравнению с факельным сжиганием углей, хотя и приводит к снижению КПД на несколько десятых долей процента, как показал предварительный тепловой расчет.

В первоначальном варианте предварительная газификация угольной дробленки осуществлялась в предтопке, состоящем из газогенератора, дожигателя и охладителя, в которых использовался кипящий слой. Они подключались к топке существующего котла, в котором производилось дожигание получаемых газов. Предварительные расчеты отдельных элементов системы позволили скомпоновать систему сжигания в целом и подобрать необходимое оборудование (рис. 1).

Во второй главе представлены комплексные результаты лабораторных исследований, постановка задачи которых диктуется практической необходимостью функционирования новой технологии, позволяющих определить конструктивно-режимные параметры процесса, обеспечивающие надежное функционирование разработанной схемы.

На стендах КазНИИЭ проведены лабораторные испытания, которые впервые на опыте показали возможность бесплаковочной воздушной газификации челябинского бурого угля. Камера газификации дробленого угля (объемом несколько дециметров) заполнялась инертным материалом (песком). Затем под решетку подавался воздух, нагретый до $\sim 600^{\circ}\text{C}$, с давлением, достаточным для псевдоожижения. При достижении в слое температуры $\sim 350^{\circ}\text{C}$ начиналась подача угольной дробленки. Температура слоя после кратковременной задержки начинала расти и в течение нескольких минут достигала $800\dots 900^{\circ}\text{C}$. При этом содержание CO в генераторных газах достигало $7\dots 8\%$, в отдельных опытах это значение было даже несколько выше.

Во всех опытах коэффициент избытка воздуха α был меньшим единицы (до 0,7). При этом камера работала устойчиво без спекообразования. Самым напряженным, с точки зрения организации бесплаковочной работы, оказался режим останова. При прекращении подачи угольной дробленки в камеру газификации, но сохранения режима воздушного дутья, коэффициент избытка воздуха приближается к единице и растет температура. Вероятность образования спеков резко возрастает.

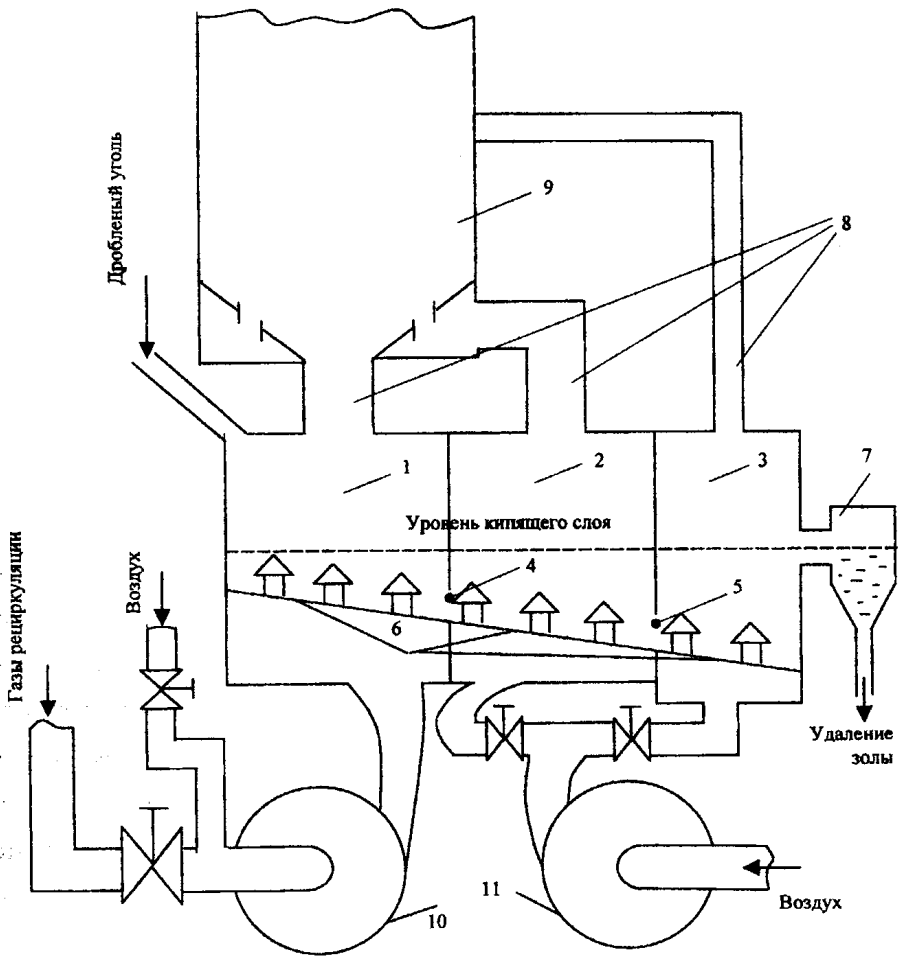


Рис. 1. Принципиальная схема системы сжигания:

1 – газогенератор; 2 – дожигатель; 3 – охладитель; 4,5 – летки; 6 – псевдооживающая решетка; 7 – устройство для вывода золы; 8 – газоходы; 9 – топка котла; 10,11 – высоконапорные вентиляторы

Уменьшать расход воздуха можно лишь до определенных значений, ниже которых слой ложится на псевдооживающее устройство. При температурах $\sim 900^\circ\text{C}$ локализация частиц слоя с уменьшением их скорости до нуля также приводит к образованию спеков. Подача вместе с воздухом инертного газа, например, газов рециркуляции, облегчает задачу останова.

На стенде был исследован ряд переходных режимов. В силу инерционности свойств кипящего слоя любое скачкообразное изменение (до 20%) входных параметров – расходов дробленого угля или воздуха в течение нескольких минут приводило к возникновению нового устойчивого режима.

Более подробное исследование состава угля (X_1), коэффициента избытка воздуха (X_2), скорости газового потока (X_3), влажности угля (X_4) было проведено на кафедре физической химии в ЮУрГУ с использованием метода планирования эксперимента. Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.

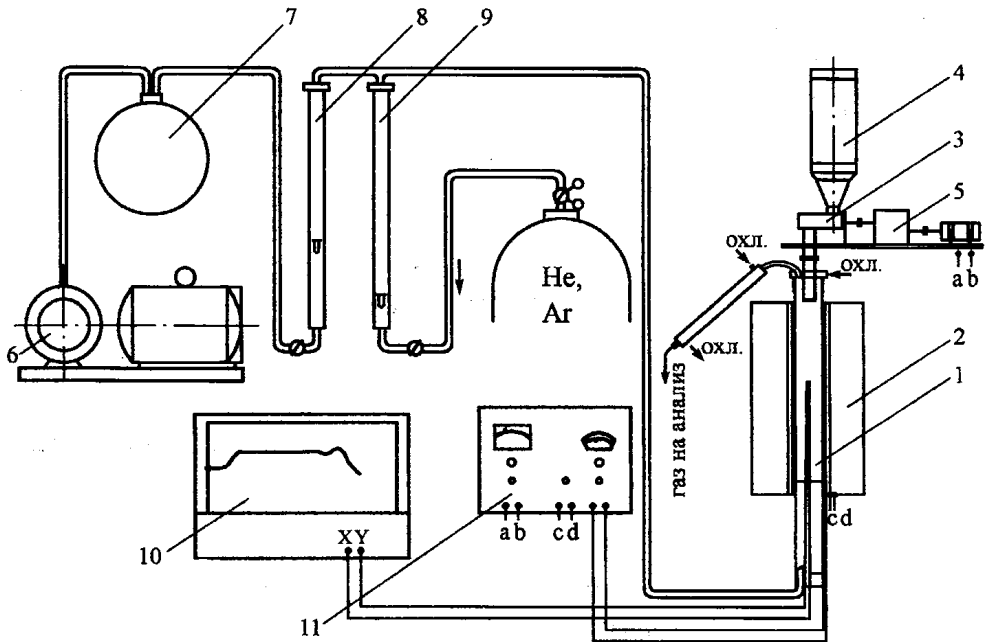


Рис. 2. Схема установки с системой измерения при изменяемых параметрах:

- 1 – кварцевый реактор с пористой подиной; 2 – печь; 3 – питатель шнековый; 4 – бункер;
- 5 – редуктор; 6 – компрессор; 7 – ресивер сжатого воздуха; 8 – воздушный ротаметр;
- 9 – ротаметр инертного газа; 10 – графопостроитель; 11 – блок питания с терморегулятором

Для проведения опытов согласно матрице планирования готовили образцы угля с необходимой влажностью и определенного дисперсного состава. Нужные

скорость газового потока и коэффициент избытка воздуха устанавливались регулированием расхода воздуха и инертного газа гелия.

Для определения получаемых параметров использовалась точная измерительная техника (масс-спектрометр, электронный микроскоп, дериватограф).

В результате получены уравнения регрессии со статистически значимыми коэффициентами:

$$Y_1 = 37,26 + 3,87X_1 + 1,20X_3$$

$$Y_2 = 48,21 - 8,83X_1 - 3,58X_2 + 13,5X_3 + 3,47X_4 + 1,97X_1X_2 + 3,53X_1X_3 + 1,32X_2X_4 - 2,23X_1X_3X_4$$

$$Y_3 = 16,01 - 2,11X_1 - 2,46X_2 - 1,74X_3 - 1,36X_4 - 0,61X_3X_4 + 2,19X_1X_2X_3 + 1,81X_2X_3X_4 - 3,96X_1X_2X_3X_4$$

$$Y_4 = 6,2 - 0,9X_1 - 0,4X_2 + 0,6X_3 + 1,3X_4 + 0,4X_1X_2 - 0,6X_1X_3 + 1,1X_1X_4 + 1,9X_2X_3 - 0,7X_2X_4$$

Из анализа уравнений регрессии можно сделать следующие выводы.

На выход золы определенной фракции влияют фракционный состав угля (X_1), скорость газового потока (X_3). Их комбинирование приводит к увеличению выхода золы нужной фракции.

На унос из кипящего слоя оказывают влияние все четыре фактора. Увеличение размера частиц угля и коэффициента избытка воздуха приводит к уменьшению уноса из слоя. Увеличение же скорости газового потока и влажности увеличивает унос. Влажность в данном случае может оказывать косвенное влияние, заключающееся в том, что порообразование ведет к измельчению частиц угля.

Образование пор в частицах золы зависит от фракционного состава угля (X_1), коэффициента избытка воздуха (X_2) и влажности угля (X_4) и их сочетания, на что указывают сильные парные и тройные корреляции. Увеличение этих факторов приведет к уменьшению порообразования.

Образование оксидов азота при сжигании угля в кипящем слое – сложный процесс и зависит от сочетания различных факторов. Линейным уравнением процесс не описывается. Сильные парные взаимодействия различных факторов

или совместное влияние технологических параметров указывает на то, что их можно рассматривать лишь в совокупности.

Выбор решения об оптимальности режима зависит от поставленной цели получить золу нужного качества, а это означает, что в ходе процесса газификации угля в кипящем слое должен быть наибольший выход определенной фракции золы с высокой пористостью, то процесс нужно вести при следующих технологических параметрах:

- большем, чем фракция требуемой золы, размере частиц угля;
- минимальном коэффициенте избытка воздуха;
- большой скорости потока;
- нулевой влажности угля.

Такой режим сжигания приведет к увеличению пылеуноса из слоя, который можно дожечь в топке котла при $\alpha > 1$.

При исследованиях превращений угольных частиц в муфельной печи было замечено, что по мере возрастания размера частиц роль внутрипористого реагирования для бурых углей снижается.

Зольные остатки челябинского бурого угля после сжигания в кипящем слое были исследованы по известным методикам. Полученные результаты говорят о возможности их применения для получения цементов рядовых марок.

Для исследования вопросов гидродинамики кипящего слоя и аэродинамики надслоевого пространства была выполнена прозрачная модель газогенератора и дожигателя с подводными и отводящими трубопроводами. В качестве модельного твердого топлива использовался мелкий дробленый уголь.

Визуализация пылегазовых потоков позволила определить наиболее оптимальные формы всего тракта с точки зрения эрозионного износа, осаждения пыли и гидродинамических сопротивлений. Равномерное ожигание достигалось по всему слою, горизонтальные размеры которого существенно превышали его высоту. При снижении скоростей псевдоожигания застойные зоны возникали вблизи стенок. При повышении скоростей выше критической наблюдались отдельные очаги отрыва слоя от решетки.

Исследование горизонтального продвижения твердых частиц показало, что неравномерности толщины псевдооживленного слоя при ее значениях на модельной установке порядка нескольких сантиметров пропадают за время, составляющее доли секунды после их возникновения. После псевдооживления дисперсный состав становится неодинаковым по высоте, что затрудняет продвижение частиц слоя по поверхности. Если две полости с кипящим слоем объединены перегородкой с отверстием, находящимся ниже поверхности слоя, то даже небольшой перепад давления (порядка нескольких Па) приводит к фонтанированию через это отверстие.

В третьей главе представлено теоретическое исследование гидродинамики газогенератора кипящего слоя. Направление исследований было продиктовано задачами обеспечения надежного выполнения технологий в целом и отдельных ее элементов.

Гидродинамические свойства псевдооживленного слоя становятся простыми и наглядными на основе анализа сил, действующих на одиночную частицу.

Полагая в первом приближении частицы сферическими, найдем условие равновесия их в псевдооживленном слое. На частицу действуют три силы.

1. $P = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g$ – сила тяжести (R – радиус частицы, ρ – плотность частицы, g – ускорение свободного падения).
2. $0,5\rho_{п.ж} v^2 \pi R^2$ – сила динамического давления ($\rho_{п.ж}$ – плотность псевдожидкости, v – скорость потока, направленная вверх, относительная).
3. $6\pi\eta Rv$ – стоксова сила трения (η – эффективная динамическая вязкость псевдожидкости).

Такие, достаточно простые, представления о динамическом состоянии частицы особенно близки к реальности, если частица находится в подвижном равновесии в псевдожидкости. Тогда сила тяжести компенсируется антипараллельными силами динамического давления и трения

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g - 0,5\rho_{п.ж} v^2 \pi R^2 - 6\pi\eta Rv = 0.$$

Определив равновесный радиус частиц и выбрав реальное значение скорости газа, можно оценить размер частиц, которые преобладают в верхних и нижних частях слоя.

Как показали экспериментальные исследования, форсирование режима псевдооживления приводит к возникновению циркуляционных ячеек в слое, внутри которых течение можно считать квазипуазейлевским, при этом скорость

$$v = \frac{\Delta P}{4\ell\eta}(R_0^2 - r^2),$$

а ее среднее значение

$$\langle v \rangle = \frac{1}{8} \frac{\Delta P}{\ell\eta} R_0^2,$$

где ΔP – перепад по длине ячейки;

ℓ – длина ячейки;

r – радиальная координата.

Средняя скорость определяет размер радиуса, на котором расслоение становится заметным, и это подтверждается экспериментально.

Более детально распределение частиц по высоте слоя было определено с помощью распределения Больцмана. Обозначая u – скорость воздушного потока относительно корпуса газогенератора, v – скорость частицы относительно корпуса устройства, $u - v$ – скорость частицы относительно воздушного потока, ρ_1 – плотность воздуха, ρ – плотность частицы, n_0 – концентрация частиц на уровне псевдооживающей решетки, n_z – концентрация частиц на высоте Z , запишем

$$n_z = n_0 \exp \left[-\frac{2R^3 gz}{\langle R^3 \rangle} \left[u - \frac{6\eta}{\rho_1 R} \left(\sqrt{1 + \frac{2g\rho_1 \rho \langle R^3 \rangle}{27\eta^2}} - 1 \right) \right]^{-2} \right].$$

С учетом невысокой вязкости воздуха, первым слагаемым под корнем можно пренебречь, и тогда выражение для n_z упростится:

$$n_z \cong n_0 \exp \left(- \frac{2R^3 gz}{\langle R^3 \rangle} \left[u - \sqrt{\frac{72g\rho\langle R \rangle}{27\rho_1}} + \frac{36\eta^2}{\rho_1^2 \langle R \rangle^2} \right]^2 \right).$$

Равномерное распределение в начальный момент приближается с течением времени к полученному выше, которое также изменяется вследствие уноса мелких фракций с поверхности слоя. Для практических расчетов можно использовать и несколько упрощенную формулу. Учитывая, что мелкие частицы двигаются в составе потока, направленного вверх, этот поток можно считать подобным потоку воздуха, но обладающим повышенной плотностью и повышенной вязкостью. С учетом этого последним слагаемым в полученном распределении можно пренебречь. Тогда распределение по упрощенной формуле будет иметь вид

$$n_z = n_0 \exp \left(- \frac{2\rho R^3 gz}{\langle R^3 \rangle \langle v^2 \rangle} \right).$$

В практике эксплуатации энергетических устройств с кипящим слоем возникают сложные ситуации, связанные с запуском устройства, с обеспечением нормальных режимов псевдооживления в зоне заброса топлива, где образуются неровности поверхности слоя при заполнении надрешеточного пространства.

Определение закономерности движения частиц, находящихся на поверхности, проведем на основе уравнения движения. Рассматриваемая частица находится на наклонной поверхности с координатами $z = h$, $x = 0$; при $z = 0$, $x = d$

$$\begin{cases} m \frac{dv_z}{dt} = -mg + K(u - v_z); \\ m \frac{dv_x}{dt} = -Kv_x, \end{cases}$$

где m – масса частицы;

v_z – вертикальная составляющая скорости частицы относительно предтопка;

u – скорость газового потока;

$u - v_z$ – скорость частицы относительно газового потока;

v_x – горизонтальная составляющая скорости;

K – коэффициент трения (Н·с/м).

Решения, удовлетворяющие уравнениям с граничными и начальными условиями $t = 0$, $v_x = 0$, $v_z = 0$, $x = 0$, $z = h$ в окончательном виде представляются выражениями:

$$x = \frac{d(uK - mg)}{(h - h_1)K\lambda}(1 - e^{-\lambda t});$$

$$z = \left[\frac{uK - mg}{K} \right] \left[\left(t + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) - \frac{1}{\lambda} \right] + h;$$

$$v_z = \left[\frac{uK - mg}{K} \right] (1 - e^{-\lambda t});$$

$$v_x = \frac{d(uK - mg)}{(h - h_1)K} e^{-\lambda t};$$

$$z = h - \frac{(h - h_1)}{d} x.$$

Из полученных выражений определяется влияние сил тяжести, коэффициента трения, скорости, соотношения высоты неровности и ширины. Очевидно, что с течением времени v_x стремится к конечной скорости, что соответствует действительности – ведь именно эта составляющая скорости обеспечивает общее перемещение квазижидкого материала, осуществление всей технологии, включая перемещение частиц вдоль всего тракта псевдооживления.

При генерации газа в кипящем слое, особенно в ячеистой структуре, важно знать отношение тепловых потоков, переносимых твердыми частицами и газом. Полученное решение для взаимодействия сил позволяет записать соотношение

$$\frac{Q_2}{Q_1} \approx \frac{\kappa_2 c_2 \rho_2}{\kappa_1 c_1 \rho_1},$$

где Q_2 – поток тепла, переносимого частицами;

Q_1 – поток тепла, переносимого газом;

$$\kappa_2 = \frac{m_2}{m}; \quad \kappa_1 = \frac{m_1}{m},$$

где m_2 , m_1 , m – масса частиц в составе псевдооживленной смеси, масса газа и масса смеси, соответственно.

Для реальных условий газификации κ_2 и κ_1 сравнимы, как c_1 и c_2 ($c_1 \sim 1000$ Дж/кг·К и $c_2 \sim 600$ Дж/кг·К), ρ_2 больше ρ_1 более чем на три порядка, поэтому тепловой поток в слое будет переноситься в основном частицами. Практически отмечено, что в случае шлакования слоя, его очаги возникают вблизи псевдоожижающей решетки, где скорость частиц имеет наименьшее значение и теплоотвод ухудшен по сравнению с другими областями слоя.

В осесимметричной постановке задачи, пользуясь представленным выражением и стационарным уравнением Фурье–Кирхгофа, найдем распределение возмущения температуры T в слое:

$$\delta(1 - \xi^2) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right),$$

$$\text{где } 0 \leq x = \frac{z}{R} \leq \frac{\ell}{R};$$

$$\xi = \frac{r}{R}; \quad \delta = \frac{\Delta P R^3}{4\ell\eta\alpha}; \quad \alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho};$$

λ – коэффициент теплопроводности;

c – удельная теплоемкость;

ρ – плотность.

Для определения постоянной T_0 можно воспользоваться плотностью потока тепловой энергии через нижнее основание ячейки и слоя:

$$Q = T_1 \rho c \langle v_z \rangle (\theta), \quad x = 0,$$

$$\langle v_z \rangle = \int_0^R \frac{v_z \cdot 2\pi r \cdot dr}{\pi r^2}.$$

v_z определяется из уравнения Навье–Стокса

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} \cdot v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right),$$

которое в линейном приближении для ячейки длиной ℓ запишется в виде

$$-\frac{\Delta P}{\ell} = \eta \left(\frac{d^2 v_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_z}{dr} \right).$$

Решением последнего уравнения будет

$$v_z = \frac{\Delta P}{4l\eta} (R^2 - r^2).$$

Полная температура определяется соотношением

$$T_{\Pi} = \frac{8Q \cdot \eta \gamma_1 \ell}{\rho c R^2 \Delta P I_1(\gamma_1)} \cdot e^{-\beta x} \theta(\xi),$$

$$\text{где } \theta(\xi) = I_0\left(\sqrt{\delta\beta + \beta^2} \xi\right); \quad \beta \cong \frac{\gamma_1^2}{\delta}; \quad \xi = \frac{r}{R};$$

λ – коэффициент температуропроводности, γ_1 – первый корень функции Бесселя; I_0 , I_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

Полученный результат говорит о том, что наиболее опасными областями слипания в конгломераты являются периферийные точки ячейки, в которых T_{Π} самые высокие. Затухание температуры происходит тем медленнее, чем больше перепад давлений (больше скорость), чем меньше вязкость и коэффициент теплопроводности.

На основе представления кипящего слоя как сплошной среды решена задача исследования нелинейной устойчивости стационарного состояния по отношению к периферийным возмущениям.

Система уравнений гидромеханики псевдооживленного слоя содержит уравнение неразрывности для газовой и твердой фаз:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \operatorname{div}(\varepsilon v_f) = 0;$$

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \operatorname{div}((1 - \varepsilon) v_s) = 0;$$

и уравнение сохранения количества движения газовой и твердой фазы:

$$\varepsilon \rho_f \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_f \nabla \right) v_f = -\varepsilon \operatorname{grad} P + \varepsilon \nabla \left\{ \lambda(\varepsilon) \nabla v_f I + \mu(\varepsilon) \left[\nabla v_f + (\nabla v_f)^T - \frac{2}{3} \nabla \operatorname{div} v_f I \right] \right\} -$$

$$-(1 - \varepsilon) c(\varepsilon) \rho_f \frac{\partial}{\partial t} (v_f - v_s);$$

$$\begin{aligned}
(1-\varepsilon)\rho_s\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_s\nabla\right)v_s &= -\text{grad}P_s(\varepsilon) + \\
+ \varepsilon\text{div}\left\{\lambda_s(\varepsilon)\nabla v_s I + \mu_s(\varepsilon)\left[\nabla v_s + (\nabla v_s)^T - \frac{2}{3}\nabla\text{div}v_s I\right]\right\} + \\
+ (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_f)g + \rho_f(1-\varepsilon)\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_f\nabla\right)v_f + n\alpha(\varepsilon)\frac{(v_f - v_s)}{\varepsilon} - \\
- (1-\varepsilon)c(\varepsilon)\rho_f\frac{\partial (v_f - v_s)}{\partial t} \frac{1}{\varepsilon}
\end{aligned}$$

где ρ_f , ρ_s – плотность газа и твердой фазы;

v_f , v_s – скорости газа и твердой фазы; ε – порозность, ($\varepsilon = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{V_f}{V}$, V_f –

объем газа, V – объем газа и твердой фазы); P – давление в газовой фазе; P_s – давление твердой фазы; $\mu_s(\varepsilon)$, $\lambda_s(\varepsilon)$ – эффективная сдвиговая и объемная вязкости твердой фазы; $\mu(\varepsilon)$, $\lambda(\varepsilon)$ – эффективная сдвиговая и объемная вязкости газовой фазы; I – единичный тензор; $(\nabla v_f)^T$, $(\nabla v_s)^T$ – тензоры, транспонированные по отношению к тензорам ∇v_f , ∇v_s ; n – среднее число (концентрация) твердых частиц в единице объема; $\alpha(\varepsilon)$ – коэффициент аэродинамической силы, действующей на твердую частицу.

Преобразуя ее и решая методом последовательных приближений, получим условия разрешимости системы уравнений третьего приближения

$$\frac{\partial A}{\partial t_2} + i\frac{\partial \omega_i}{\partial k}\frac{\partial A}{\partial x_1} + \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial k^2}\frac{\partial^2 A}{\partial x_1^2} = \frac{\omega_i}{\varepsilon^2}A - \beta_1|A|^2A,$$

где A , ω , k , x – амплитуда, частота, волновое число, горизонтальная координата; $\beta(\varepsilon) = \frac{n d(\varepsilon)}{\varepsilon}$, ε – порозность, величины, рассчитанные для соответствующих приближений.

В задаче об устойчивости кипящего слоя частота $\omega_r = 0$, и в системе выполняется принцип смены устойчивости.

При анализе устойчивости были взяты следующие значения основных параметров:

- высота кипящего слоя $H = 0,8$ м;
- высота распределительного устройства $H_p = 0,5$ м;
- высота свободного пространства над кипящим слоем $H_{\Gamma} = 2$ м;
- плотность твердой фазы $2,8 \cdot 10^3$ кг/м³;
- порозность стационарного кипящего слоя $0,4$;

$$C(\epsilon_0) = 0,5;$$

- плотность газовой фазы $1,2$ кг/м³;

$$\frac{dP^s}{d\epsilon} = 0.$$

Основное влияние на устойчивость псевдооживленного слоя оказывает отношение перепада давления на распределительном устройстве к перепаду в кипящем слое. Увеличение перепада давления на распределительном устройстве увеличивает область устойчивости кипящего слоя. На рис. 3 приведены кривые нейтральной устойчивости и выделены области устойчивого и неустойчивого поведения кипящего слоя.

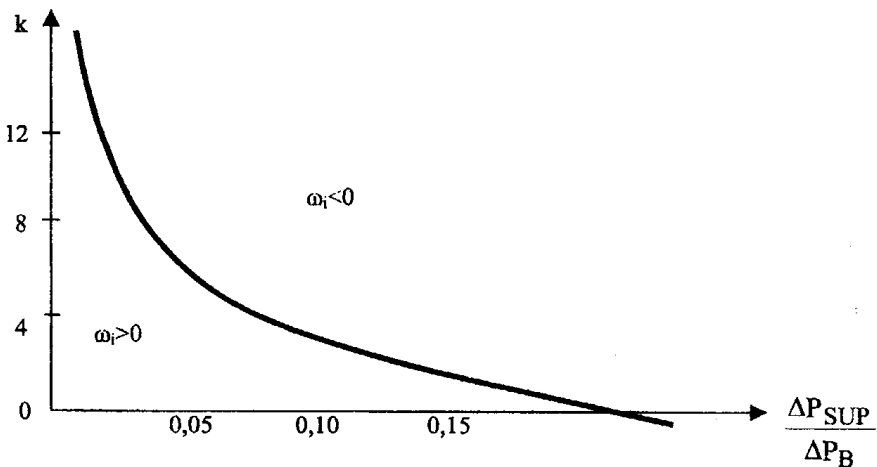


Рис. 3. Кривые нейтральной устойчивости

Скорость роста возмущений, приведенная на рис. 4 быстро уменьшается с ростом перепада давлений на распределительной решетке.

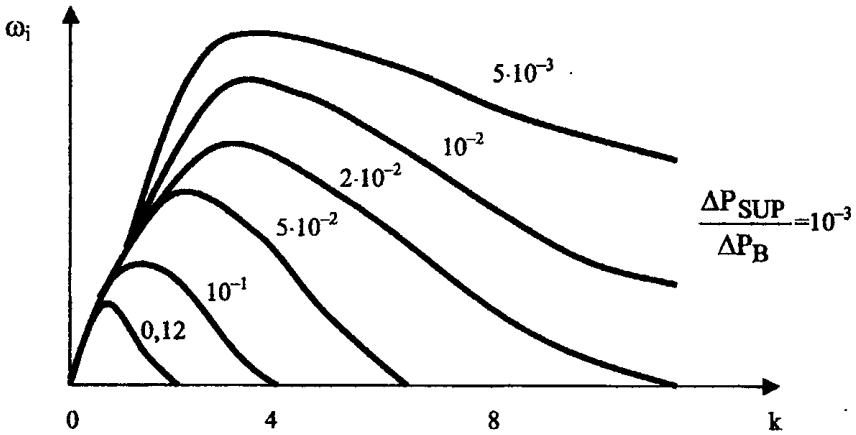


Рис. 4. Скорость роста возмущений в зависимости от отношения перепадов давления в распределительном устройстве к перепаду давления в кипящем слое

В результате развития неустойчивости в кипящем слое развиваются квазипериодические циркуляционные движения твердой фазы. На рис. 5 приведены линии тока возмущенного потока газовой фазы и линии уровня порозности стационарного циркуляционного течения.

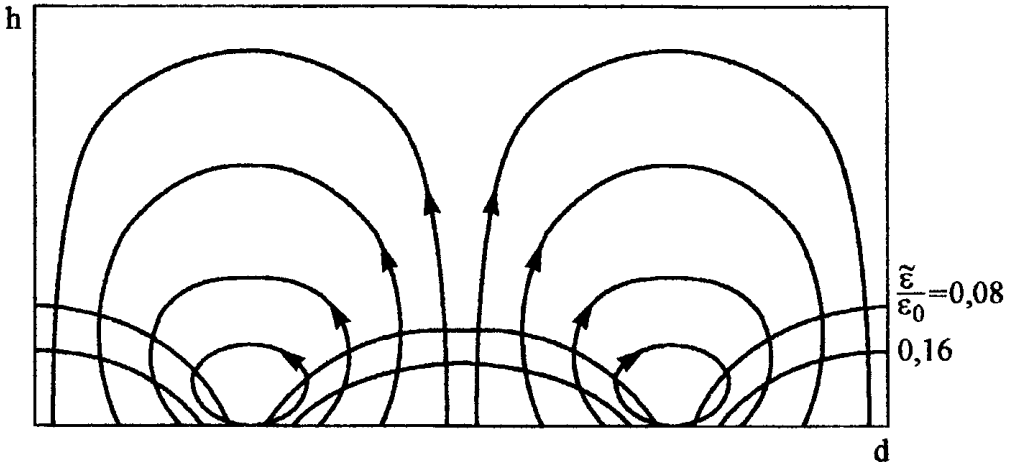


Рис. 5. Линии тока возмущенного потока газа и линии уровня порозности стационарного циркуляционного течения

В результате развития неустойчивости развиваются стационарные вихревые циркуляционные течения, центр которых расположен в нижней части кипящего слоя, где процессы горения наиболее интенсивны. Вихревые циркуляционные течения газа накладываются на стационарный вертикальный поток газа, что приводит к увеличению скорости в областях, где направление векторов скорости стационарного потока газа и возмущенного совпадают, и к уменьшению скорости в областях, где векторы имеют противоположное направление. Расчет нелинейной неустойчивости показывает, что амплитуда скорости может достигать 0,36 от скорости стационарного течения, т.е. скорость истечения газа через форсунки, расположенные в зоне совпадения направлений векторов скорости основного и возмущенного потоков более чем в два раза будет превышать скорость при противоположном направлении векторов скорости основного и возмущенного течений. В зонах уменьшения скорости увеличивается концентрация твердых частиц и уменьшается порозность. Уменьшение скорости может привести к седиментации твердых частиц и образованию спеков.

Анализ слоя после испытаний убедительно показал, что циркуляционные ячейки действительно возникают в кипящем слое.

Проведенные «горячие» испытания предтопка показали, что гидродинамика кипящего слоя существенно влияет на образование спеков, которые возникают на определенных режимах на границах циркуляционных ячеек.

В работе приводится анализ критериального описания псевдооживленных смесей говорит о том, что кроме применяемых эмпирических формул можно также рекомендовать как число Re , записанное с учетом скорости витания частицы и число Фруда, записанное с учетом размера циркуляционной ячейки и высоты слоя для дробленки с определенным распределением по размерам.

Исследование вязкости смесей (газ-угольная крошка) является важным для обоснования проектирования и элементов технологии, например, отверстия различной формы, через которые осуществляется переток смесей. В отсутствие надежных методик, позволяющих рассчитывать течение смесей в различных условиях, важно установить механизм, влияющий на вязкость.

В работе приведен сравнительный анализ двух гипотез: Прандтля и Колмогорова. Первая из них предполагает, что в турбулентных течениях отдельные объемы жидкости макроскопического размера движутся, как единое целое; ведут себя подобно свободным молекулам газа. Прандтль связал вихревую вязкость с осредненными характеристиками турбулентности; в основу гипотезы положено, что путь перемешивания аналогичен пути свободного пробега молекул, ввиду чего Прандтль предположил, что коэффициент вихревой вязкости равен произведению пути смещения и некоторой соответствующей скорости. При прохождении пути перемешивания происходит полный обмен импульса переноса вязкого взаимодействия поля с окружающей средой.

Гипотеза Колмогорова позволяет описать механизм передачи кинетической энергии от крупных вихрей к мелким с последующей диссипацией в мелких вихреобразованиях. Согласно гипотезе диссипация и другие определяющие величины зависят только от энергии турбулентных пульсаций и масштаба турбулентности.

Сравнение применения двух гипотез проведено для течения в плоских каналах. Полученная минимальная величина вихревой вязкости находится в центре канала. Эта закономерность относится как к ньютоновским жидкостям, так и к ожигненным смесям «твердые частицы–газ».

Модель двумерного течения с использованием гипотезы Прандтля объясняет некоторые закономерности течения в переходной летке между газогенератором и дожигателем. Частицы ожигненного слоя, находящиеся в центре летки, в момент, когда верхний уровень кипящего слоя опускается ниже верхнего края летки, резко увеличивают свою скорость. При этом увеличивается скорость газов в районе летки.

В четвертой главе анализируется вопрос разработки моделей газогенератора кипящего слоя. Применение простейших диффузионных моделей показывает распределение горючих в слое, экспоненциально возрастающее по мере увеличения вертикальной координаты. Очевидно, такая закономерность характерна для процесса газогенерации, но в отличие от случая, когда $\alpha > 1$, слой вряд ли можно считать однородным.

Анализ рассмотренных математических моделей с целью адекватного описания процесса газогенерации показывает, что она должна включать уравнения: 1) неразрывности газовой и твердой фазы; 2) сохранения количества движения газовой и твердой фазы; 3) изменения концентрации кислорода в газовой фазе; 4) изменения концентрации горючей составляющей твердой фазы. Учесть все параметры в математической модели невозможно из-за их многочисленности и неопределенности некоторых из них.

Для описания процесса газогенерации в кипящем слое была выбрана модель Тамарина, где используется трехконтинуальная модель, которая содержит нелинейные уравнения сохранения концентраций кислорода в газовой фазе и пузырях, сохранения энергии твердых частиц и газовой фазы и включают функциональные зависимости для интенсивности поглощения кислорода и тепловыделения по толщине кипящего слоя, среднего размера горячей частицы, эффективной энергии активации процесса горения, среднего коэффициента диффузии. Методом параметрической идентификации, которая позволяет по ограниченному числу косвенных измерений восстановить вектор состояния системы и оценить неизвестные параметры, которые оказались следующими:

$E = 108,4 \pm 19,2$ – эффективная энергия активации (по данным Киевского института проблем энергосбережения – 107,6);

$\varphi = 1,84 \pm 0,34$ ($1/\varphi$ – средний размер горячей частицы угля);

$\alpha_1 = 5,18 \pm 0,71$; $\alpha_2 = 2,76 \pm 0,40$ – интенсивность поглощения кислорода и тепловыделения по толщине кипящего слоя;

$\alpha_3 = 2,42 \pm 0,35$; $\alpha_4 = 1,64 \pm 0,22$.

Модель идентификации достаточно полно учитывает гидродинамические параметры кипящего слоя, вопросы химической кинетики учтены опосредованно. Эта модель полезна при наладке и проектировании новых аппаратов.

Для оценки выходных параметров генераторного газа, его состава и температуры, можно использовать простейшую модель идеального смешения, которая показала качественное совпадение с экспериментальными результатами.

В пятой главе представлены результаты испытаний предтопка и их анализ. Предварительные лабораторные исследования показали принципиальную воз-

возможность воздушной газификации бурых углей в кипящем слое. Однако вместе с тем стали понятны и трудности внедрения исследуемого способа газификации. Одна из них – шлакование слоя при переходных режимах, запуске и останове. На опытно-промышленном образце для предотвращения шлакования была применена присадка инертных газов, газов рециркуляции к дутьевому воздуху, с помощью которых можно управлять температурой слоя, не меняя его гидродинамику. Однако вопрос количественных соотношений могли решить только испытания, многое зависело от способа заброса топлива, от того, как используется инертный сыпучий материал. Перед проведением испытаний стояли и другие вопросы, такие как вопросы, связанные с уносом мелких фракций материала слоя с его поверхности, совместной работы предтопка и котла, в котором дожигались генераторные газы.

На все перечисленные вопросы, а также на другие, возникшие в ходе проведения испытаний, были получены ответы. Котел воспринимал нагрузку от сжигания генераторных газов, все его параметры находились в расчетных пределах.

При проведении целого ряда испытаний в газогенераторе из трех секций возникали спеки, особенно в первой секции, куда забрасывалось топливо. В результате были определены зависимости, выделяющие бесплаковочные режимы газификации, которые определяются для челябинского бурого угля концентрацией горючих в слое, температурой и скоростью движения газового потока. Механизм этой зависимости реализуется вследствие возникновения отдельных областей в слое, в которых коэффициент избытка воздуха приближается к стехиометрическому, что приводит к местному повышению температуры и слипанию частиц. Дальнейшее их движение в виде конгломерата или отдельно зависит от первоначальной относительной скорости, которая определяется скоростью газа.

Существенную роль в протекании процесса газогенерации играет унос мелких фракций с поверхности слоя. В стационарном режиме устанавливается равновесие между поступающим дробленным топливом и уносимыми мелкими частицами с поверхности слоя. Однако на переходных режимах могут возникать неустойчивые процессы, экспоненциальное повышение или снижение темпера-

туры. В ходе испытаний был определен тот предельный скачок параметров регулирования, при котором возникает необратимое изменение температуры (рис. 6, 7).

Механизм возникающей аperiodической неустойчивости заключается в том, что при переходе на новый режим работы газификатора изменяется скорость газа и расход уносимых с поверхности слоя частиц, которые содержат горючие элементы. В результате изменяется коэффициент избытка воздуха в слое и его температура. Изменение температуры ведет к дальнейшему изменению скорости. Однако в слое происходит целый ряд других процессов, таких как дробление частиц, возврат их в глубину слоя, которые препятствуют неустойчивости.

Перечисленные факторы также влияют на механический недожог уносимых частиц (рис. 8).

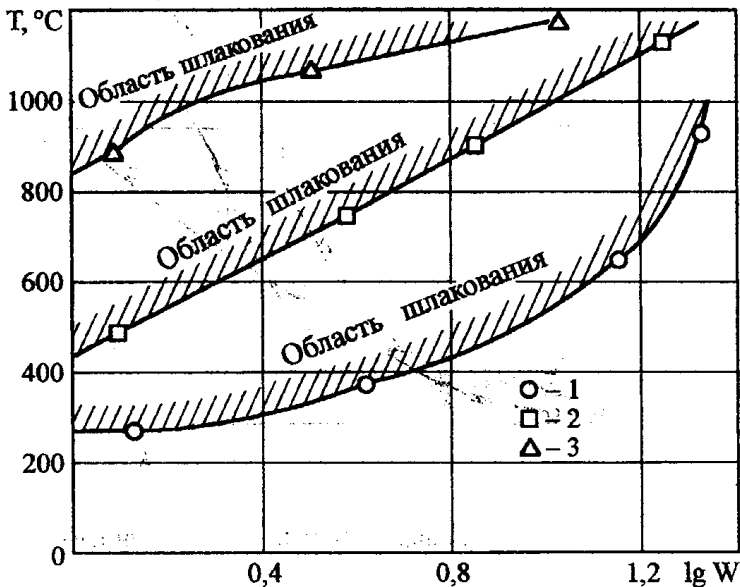


Рис. 6. Зависимость начала спекобразования в предтопке от основных параметров при газификации челябинского бурого угля.

Концентрация горючих 1—0,4; 2—0,25; 3—0,15

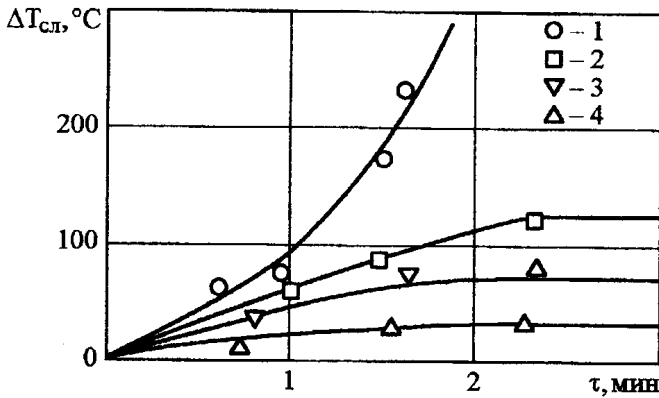


Рис. 7. Изменение температуры слоя с течением времени при различных величинах приращения расхода дутьевого воздуха по отношению к номинальному

$$\Delta G_{\text{воз}}/G_{\text{воз.н.}} : 1-20\%; 2-15\%; 3-10\%; 4-5\%$$

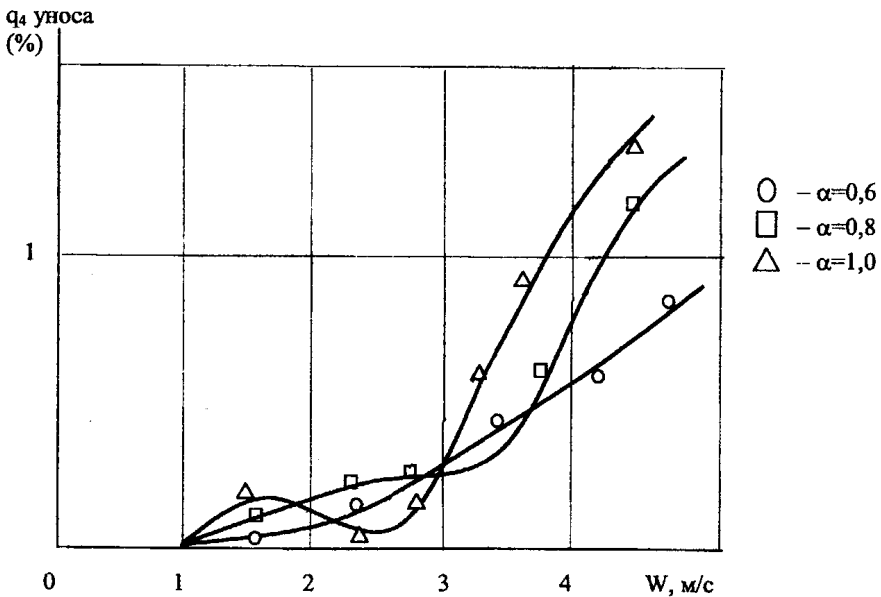


Рис. 8. Влияние режимных параметров на недожог уносимых частиц

Испытания опытно-промышленного образца показали, что газификация твердого топлива в кипящем слое с последующим дожиганием в существующих котлах имеет ограничение по уровню применяемых скоростей, которое определяется размером уносимых частиц, не успевающих выгореть за время прохож-

дения вдоль топки котла. Сравнение с нормативным недожогом дает предельный размер частицы 400–500 мкм. Соответствующие скорости дутьевого воздуха не позволяют обеспечить высокую производительность газификатора. Поэтому 1-я секция газификатора была модернизирована с целью получения в ней качественных форсированных режимов, в которой использовалось вихревое движение газового потока, различные способы забрасывания поступающего топлива, различные способы вывода генерируемого газа и твердых частиц и различные геометрические размеры и конфигурация 1-й секции.

Полученный в результате испытаний опыт и экспериментальный материал позволили выделить направление совершенствования процесса газификации дробленки твердого топлива, использующее скоростную вихревую отдельную секцию и секцию с кипящим слоем для дожигания твердого топлива.

В шестой главе рассмотрены вопросы оптимизации схем и характеристик газогенератора, разработка промышленного образца. Полученный опыт говорит о том, что 1-я секция газификатора должна быть выполнена в виде отдельной камеры для удобства наладки и эксплуатации. Поэтому для дальнейших проработок были выбраны 3 различные схемы камеры (рис. 9), по которым были изготовлены пилотные установки, на которых проводилось моделирование процесса. В качестве топливных компонентов применялись воздух и мелкая угольная крошка. Все 3 камеры в той или иной мере удовлетворяли основным требованиям: надежность зажигания поступающего топлива; устойчивость против шлакования; невысокий

относительный унос мелких фракций $G'_{ун} = \frac{G_{ун}}{G_{тп}}$, где $G_{ун}$, $G_{тп}$ – расход уносимых частиц, расход поступающего в камеру твердого топлива; эффективность и производительность системы газогенерации и ее управляемость.

В исследуемой камере находится постоянно в движении определенное количество вращающегося (циркулирующего) топлива. Если в камере нет застойных зон, то масса горящих в камере частиц создает хорошие условия для зажигания, обеспечивая эффективность и производительность газификатора. Уровень относительной скорости газового потока более чем на порядок выше, чем в кипящем слое. Следовательно, устойчивость процесса против шлакования существенно выше.

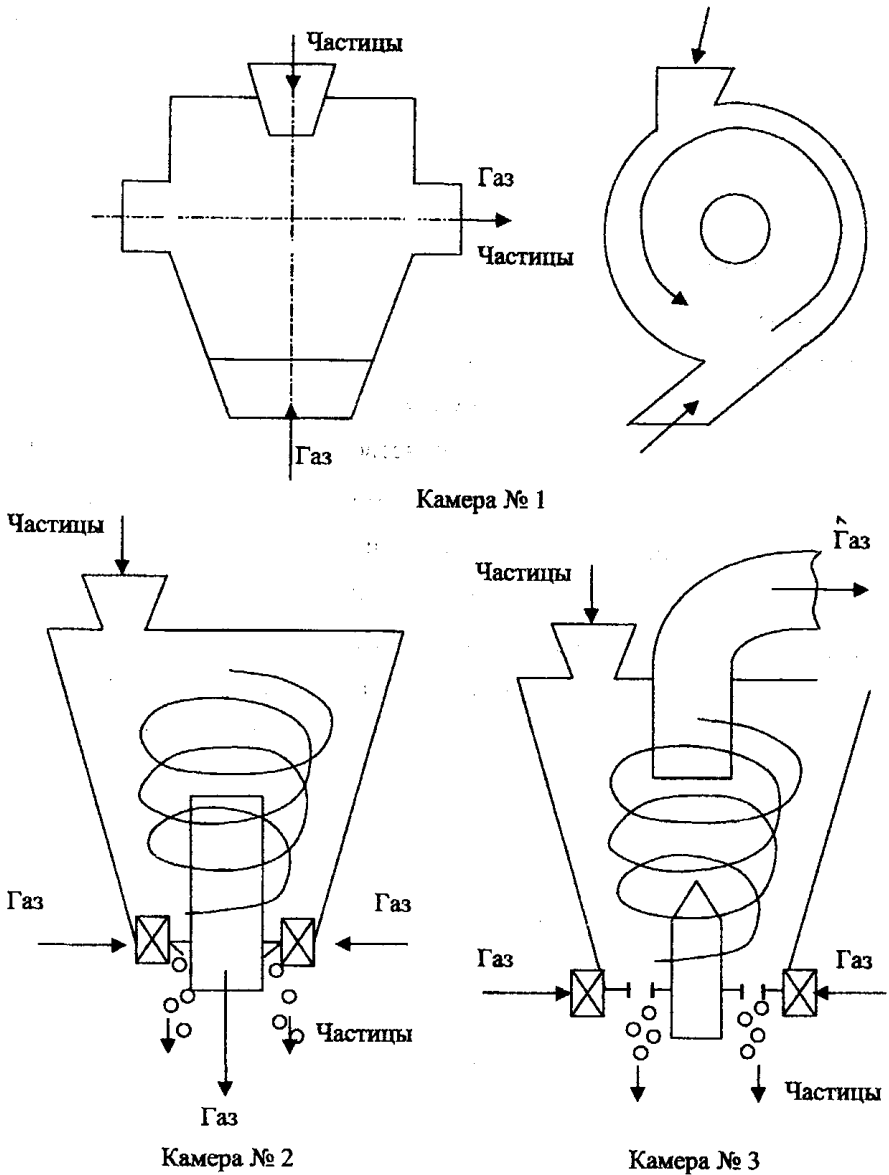


Рис. 9. Схемы испытанных камер

Кроме того, в закрученном газовом потоке крупные твердые частицы сепарируются и отделяются от уходящих продуктов газогенерации. Регулированием режимных параметров устанавливается соотношение между расходами реагентов и уносимыми твердыми частицами.

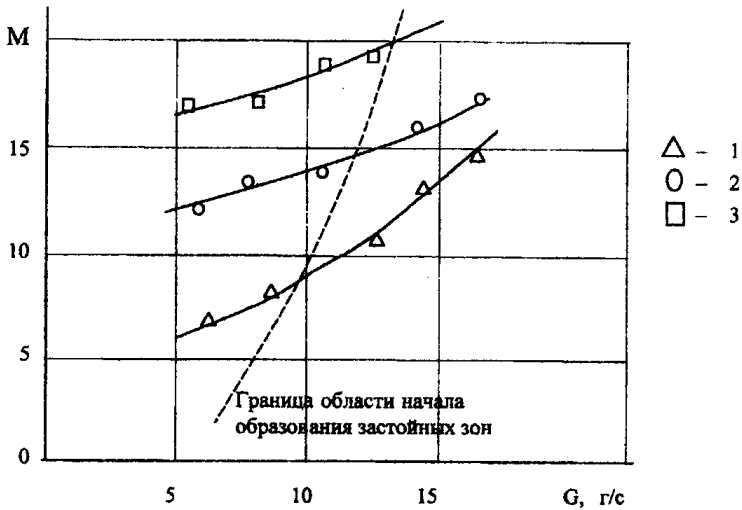


Рис. 10. Зависимость относительной массы циркулирующего материала от расхода дробленого угля при постоянном соотношении газ-твёрдые частицы, соответствующем $\alpha \approx 0,6$ (1, 2, 3 – номера камер); M – отношение массы циркулирующего материала к массе, поступающей в камеру за секунду

Лучшие характеристики оказались у камеры, работающей по схеме № 3.

Отношение расходов уносимых частиц к выводимым через нижнее отверстие меньшим оказалось в камере № 3 при всех расходах (рис. 11).

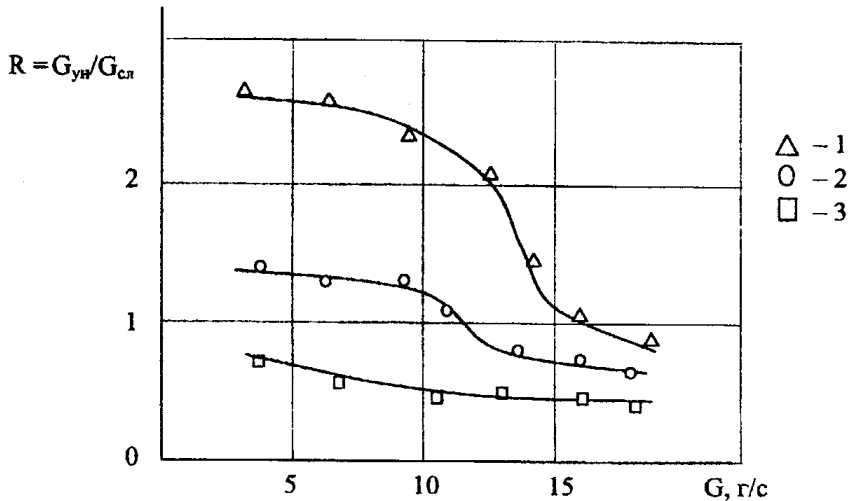


Рис. 11. Отношение расходов уносимых частиц к выводимым через нижнее отверстие камеры (1, 2, 3 – номера камер) в зависимости от расхода дробленого топлива ($\alpha \approx 0,6$)

Таким образом, из всех испытанных для дальнейших огневых испытаний были отобраны камеры № 2 и № 3, схема стенда представлена на рис. 12.

Разогрев камеры и подсветка – подача, хорошо воспламеняемого дополнительного газового топлива, осуществлялись с помощью газовой горелки. Более устойчиво без подсветки работала камера № 3, несмотря на большие тепловые потери, так как камера не была теплоизолирована. В качестве топлива использовалась мелкая дробленка (0–5 мм) челябинского бурого угля. В процессе испытаний при повышении температуры камеры до 900°C были отмечены очаги шлакования. Для того, чтобы определить, насколько процесс в камере отвечает основным требованиям, а также определить возможности его оптимизации, были исследованы элементы процесса. Для этого была проведена оценка влияния тангенциальной составляющей скорости на распределение частиц в камере.

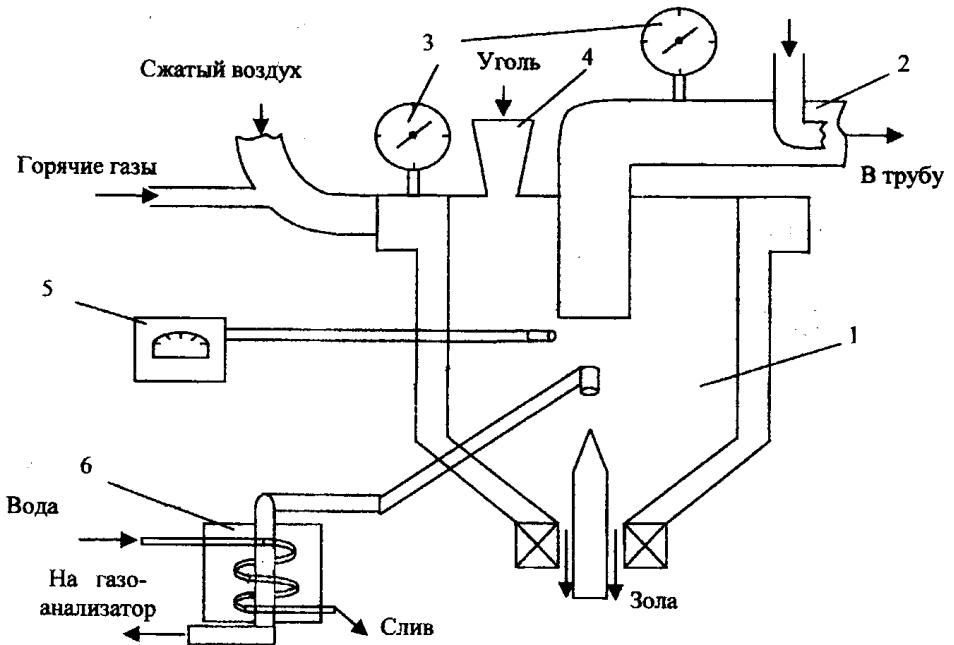


Рис. 12. Схема модельной установки для горячих испытаний:

- 1 – камера; 2 – выхлопная труба; 3 – монометры; 4 – заброс топлива;
5 – система измерения температуры; 6 – система отбора газа с охлаждением

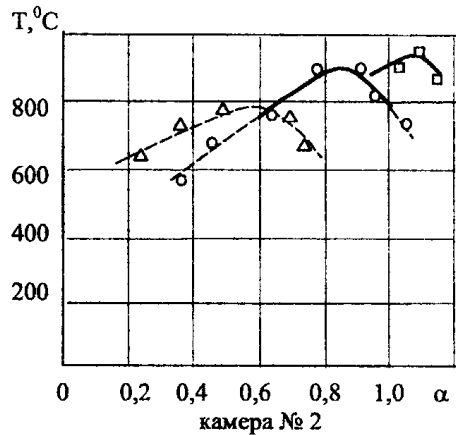
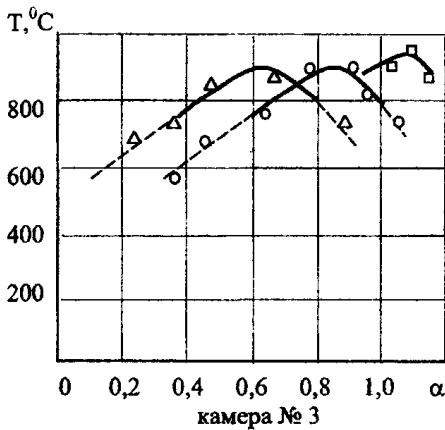


Рис. 13. Зависимость температуры в камере от расходов и соотношения
компонентов

Δ – 5 г/с; \circ – 7 г/с; \square – 9 г/с – расход угольной крошки

————— – область устойчивой газификации без подсветки;

----- – область газификации с подсветкой

Уравнение Навье–Стокса для нашего случая можно записать в виде

$$-\mu = \eta \left(\frac{d^2 v_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_\varphi}{dr} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right),$$

$$\text{где } \mu = \frac{P}{2\pi R} \approx \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi},$$

η – динамическая вязкость;

v_φ – тангенциальная составляющая скорости;

P – давление;

φ, r – угловая и радиальная координаты.

После подстановки решения уравнения Навье–Стокса в виде

$v_\varphi = -\frac{\mu}{3\eta}(R\eta - r^2)$ в уравнение Больцмана, записанного следующим образом

$$N(r, v, t) = N_0 + \omega^2 r \frac{dN(r, t, v_\varphi)}{dv_\varphi},$$

где N_0 – стационарная концентрация, обусловленная постоянным потоком частиц;

$N(r, t, v_\varphi)$ – локальная концентрация;

τ – время релаксации;

ω – угловая скорость,

получаем решение

$$\frac{N(r, v_\varphi, t) - N_0}{N_0} = \exp \left[- \frac{\mu(-R \ln \frac{r}{R} + 2r)}{3\tau\omega^2 r} \right],$$

$$\tau = \frac{m}{6\pi\eta r_0},$$

из которого следует, что максимальная концентрация возникает при $r = R/\tau$. Эксперимент показал, что именно в этом месте камеры, где наибольшая концентрация частиц, возникают очаги плавления. Время релаксации составляет примерно ~ 3 секунды для крупных фракций, что для оценки времени слипания частиц оказывается достаточным.

Учет того, что центральные и периферийные слои вращаются по различным законам, качественного изменения характера распределения не дает. Учет влияния температуры сказывается на распределении через теплофизические и геометрические параметры τ , α , β (β обозначено в главе 3). Чем больше эти параметры, тем больше неравномерность.

Ориентировочный расчет гидравлических параметров камеры свидетельствует о том, что существующее оборудование обеспечивает ее необходимые параметры.

При анализе эффективности процесса газогенерации показано, что в основном она зависит от относительной скорости газа и частиц в камере. Ее величина положительно влияет как на скорость горения частиц, так и на содержание горючих элементов в генерируемом газе. Эта же скорость позволяет выполнить все основные требования, которые предъявляются к камере для газификации топлива. Таким образом, как макроанализ с позиций функционирования аппарата, так и микроанализ с позиций процессов на поверхности частиц и в ее порах по-

казывают правильность выбранного направления совершенствования процесса газогенерации твердого топлива для работы в системе сжигания.

В заключительной части диссертации показано, что в оптимальном варианте конструкция устройства содержит как газификационную форсированную часть, так и дожигательную, использующую кипящий слой (рис. 14).

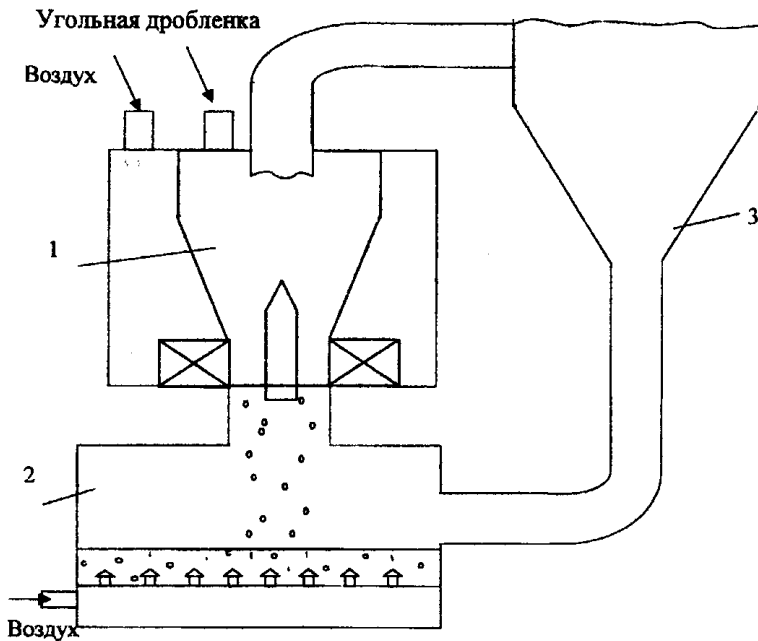


Рис. 14. Укрупненная схема системы сжигания:

1 – газогенератор, 2 – дожигатель, 3 – котел

При этом возможны различные варианты компоновки устройства. Но предпочтительным является вертикальное расположение всех частей газогенератора, как более простое с точки зрения его наладки.

В настоящее время на ТЭЦ-2 г. Челябинска такая система запроектирована и в основном изготовлена и смонтирована. Можно ожидать, что одно из применений она найдет для таких твердых топлив, которые невозможно сжигать на действующих котлах или их сжигание связано с низкими экономическими и экологическими характеристиками, например, механическим недожогом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны теоретические положения и критерии эффективности газификации угольных частиц для систем сжигания твердого топлива и показаны пути их реализации. Исследования проводились в широком диапазоне скоростей газового потока, топливом служил дробленый уголь; газификация осуществлялась в подвижных слоях, вначале исследовался кипящий, или псевдооживленный, слой.

2. Теоретические исследования гидродинамики кипящего слоя дробленого угля позволили получить соотношения для расчета основных параметров, обеспечивающих запас надежности работы газификатора без расслоения и спекообразования; экспериментально подтверждена принципиальная возможность воздушной газификации, определены и оптимизированы основные параметры, от которых зависит работа системы сжигания с предварительной газификацией угольных частиц.

3. На основе представления кипящего слоя как сплошной среды получена граница устойчивости в нелинейном приближении, получено решение системы уравнений, описывающих гидродинамику, возникновение циркуляционных конвективных ячеек. В результате развития неустойчивости возникает неравномерность поля скоростей частиц и газа, которые могут привести в области пониженных скоростей к образованию спеков. Стабилизирующее влияние на кипящий слой оказывает уменьшение размеров твердых частиц, уменьшение плотности твердых частиц, увеличение порозности, увеличение вязкости газа. Показано, что распределение температуры слоя по высоте также зависит от вязкости газа и теплопроводности слоя, которые осуществляются, в основном, за счет твердой фазы. Анализ моделирования газификации угольных частиц в кипящем слое показал, что трехконтинуальная модель отражает ее основные закономерности, если учесть распределение температур по высоте слоя, и позволяет идентифицировать неизвестные параметры процесса.

4. Создана система сжигания, включающая предтопок кипящего слоя — опытно-промышленный образец, который был испытан совместно с котлом, в

котором дожигался генераторный газ. В первой секции газогенератора изменялись режимы ведения процесса и его конструктивные параметры, что позволило определить пределы возможного форсирования кипящего слоя и основное направление совершенствования газификатора.

5. Теоретические проработки и экспериментальные исследования на «холодных» и «горячих» моделях показали повышение эффективности процесса с увеличением скорости газового реагента и определили применение закрученного движения в выделенной форсированной секции-ступени в отдельную камеру. Сравнительный анализ схем, отличающихся по входным устройствам воздуха и дробленого угля и выходным устройствам продуктов газификации показал наилучшие характеристики одной из них, которая была использована в качестве первой ступени газификатора.

6. Разработанная модель первой ступени газификатора позволила на основании уравнения Больцмана выявить основные закономерности движения частиц в закрученном потоке газа и их распределение в зависимости от радиуса. Наибольшая плотность распределения наблюдается в сечении, расположенном от оси камеры на расстоянии, составляющим половину радиуса, где отмечается и наибольшая вероятность возникновения спеков.

7. На основании теоретических и экспериментальных исследований была разработана 2-ступенчатая схема газификации дробленого угля, из которой первая ступень — скоростная вихревая; вторая ступень обеспечивает дожигание с кипящим слоем коксоугольных частиц и утилизацию золы. Производительность газогенератора может перераспределяться между ступенями в зависимости от вида угля, его дисперсного состава. 2-ступенчатая система газификации адаптируется для эффективного с точки зрения экономики и экологии сжигания новых видов топлива.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Кузнецов Г.Ф. Физико-химические процессы и технология газификации твердого топлива. – Челябинск: ЮУрГУ, 2002. – 174 с.
2. Совершенствование технологии сжигания органического топлива на энергокотлах Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, В.В. Петров и др. – Челябинск: ЮУрГУ, 2002. – С. 148.
3. Кузнецов Г.Ф. Исследование аэродинамических процессов в газогенераторе с подвижным слоем // Труды Межд. форума по теплообмену ММФ–2000. – Минск, 2000. – С. 82–86.
4. Оптимизация сжигания челябинских углей в кипящем слое / Г.Ф. Кузнецов, И.Ю. Пашкеев, В.В. Петров и др. // Химия физических процессов горения и взрыва: Горение: Тез. 10 Симп. по горению и взрыву. – Черногоровка, 1992. – С. 192–196, 226.
5. Кузнецов Г.Ф. Исследование выгорания пенообразных топлив при условии турбулентной диффузии // Труды Минского международного семинара по тепло- и массообмену. – Минск: ИТМО, 1988.
6. Рябинин В.К., Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В. Макрокинетическая модель газогенерации в кипящем слое угольных частиц // Химическая физика процессов горения и взрыва: Материалы XI симпозиума по горению и взрыву. – Черногоровка, 1996. – С. 48.
7. Исследование газификации челябинского бурого угля в низкотемпературном кипящем слое / Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, К.А. Сулейменов, В.В. Осинцев // Доклад на Всесоюзном симпозиуме «Проблемы газификации углей». – Красноярск: КПИ, 1991. – С. 73–76.
8. Энерго-экологические проблемы сжигания твердого топлива в котельных установках / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Е.В. Торопов, Г.Ф. Кузнецов, А.К. Сулейменов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – С. 192.
9. Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В. Вовлечение в энергобаланс углей ухудшенного качества // Тезисы доклада на Всесоюзном симпозиуме по энергосбережению. – Иркутск, апр. 1992. – С. 19.

10. Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., Елюхина И.В. Оценка влияния гидродинамических условий на интенсивность процессов горения в кипящем слое // Тез. докл. Межд. научно-техн. конференции «Проблемы ресурсо- и природосбережения в энергетике». – Харьков, 1994. – С. 17.
11. Елюхин В.А., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В. Устойчивость неоднородных псевдооживленных систем // Труды Минского международного форума по тепломассообмену. – 1992. – С. 51–58.
12. Математическое моделирование процесса термической переработки одиночных частиц твердого топлива / В.П. Пацков, А.Н. Дудник, А.А. Анищенко, Г.Ф. Кузнецов // ИФЖ, 1995, янв.–февр. – Т. 68. – №1. С. 96–109.
13. Численный анализ процесса выгорания коксовых частиц в сухом воздухе / В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.А. Анищенко, Г.Ф. Кузнецов // Физика горения и взрыва, РАН СО, 1994, март–апр. – Т. 30. – №2. – С. 33–42.
14. Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К., Елюхин В.А. О влиянии режима пленочного течения на качество ее распыливания // Известия академии наук Киргизской ССР. – 1986. – № 4. – С. 31–34.
15. Перевод котла БКЗ–210–140Ф Челябинской ТЭЦ-2 на технологию сжигания природного газа с отдельным тангенциальным вводом реагентов в топку / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Г.Ф. Кузнецов и др. // Электрические станции, 1994. – №7. – С. 13–19.
16. Кузнецов Г.Ф., Петриченко Н.А., Бкувштейн А.А. // Известия вузов. Физика. – Томск, 1983. – № 9. – С. 52–55.
17. Особенности сжигания углей Киргизии при колебаниях расходов реагентов / Г.Ф. Кузнецов, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев и др. // Депонированная рукопись в журнал «Известия АН КирССР» Серия физико-технических и математических наук. – Фрунзе, 19.04.1988. биб ВИНТИ, № 3789–В88, 13с.
18. Елюхина И.В., Кузнецов Г.Ф. Редукция к нелинейному параболическому уравнению Гинзбурга–Ландау системы уравнений гидромеханики псевдооживленного слоя // Труды 10-ой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». – Самара: Изд-во СамГТУ, 2000.

19. Торопов Е.В., Кузнецов Г.Ф., Елюхина И.В. Исследование и идентификация неустойчивых тепломассообменных процессов в кипящем слое // Доклад Межд. Форума по тепломассообмену ММФ-96. – Минск.–1996.– Т.5.– С. 105–111.

20. Елюхина И.В., Торопов Е.В., Кузнецов Г.Ф. Исследование в рамках уравнения Гинзбурга–Ландау неустойчивости волновых пакетов в топках с кипящим слоем // Труды Межд. Форума по тепломассообмену ММФ-2000. – Минск, 2000. – С. 146–150.

21. Анализ эффективности сжигания природного газа и бурого угля ухудшенного качества на котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров и др. // Электрические станции. – 2001. – №6. – С. 26–34.

22. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров и др. // Электрические станции. – 2002. – №11. – С. 14–19.

23. Пацков В.П., Редькин В.Б., Анищенко А.А., Чернявский Н.В., Кузнецов Г.Ф. // Химия физических процессов горения и взрыва: Горение: Тез. 10 Симп. по горению и взрыву. – Черногоровка, 1992. – С. 81–82, 213.

24. Результаты испытаний и совершенствование парового котла паропроизводительностью 58,3 кг/с с газогенератором твердого топлива / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, Н.П. Сухарев // Теплоэнергетика.– 2002.– №5. – С. 36–41.

25. Перспективы энергетических технологий использования бурого угля / В.В. Петров, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов и др. // Труды международной научной конференции «Проблемы энергетики».– Алма-аты: КазНИИЭ, 1994. – Ч. II. – С. 19–20.

26. Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В. Вовлечение в энергобаланс промышленного региона низкосортных топлив – перспектива развития технологии сжигания в энергетике // Научные основы создания энергосберегающей техники и технологий: Материалы всесоюзной конференции. – М.: МЭИ, 1990. – С. 199–200.

Патенты и авторские свидетельства

1. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Торопов В.В. Воронин В.П. Патент №2078283. Способ сжигания дробленого угля и устройство для его осуществления. – 1997 // Б.И. – №12.
2. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Хидиятов А.М. Авт. свид. № 1160180. Горелочное устройство, 1985 // Б.И. – № 21.
3. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Хидиятов А.М. и др. Авт. свид. № 1276877. Горелка, 1986 // Б.И. – № 46.
4. Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., Джундубаев А.К. и др. Авт. свид. № 1361427. Горелка, 1987 // Б.И. – №47.
5. Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К., Глуховеров В.П. и др. Авт. свид. № 1448183. Установка для термической обработки зернистого материала, 1988 // Б.И. – №48.
6. Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К., Осинцев В.В. и др. Авт. свид. № 1629692. Топка с кипящим слоем, 1991 // Б.И. – №7.
7. Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К., Елохин В.А. и др. Авт. свид. № 1629693. Топка с кипящим слоем, 1991 // Б.И. – №7.
8. Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К., Осинцев В.В. и др. Авт. свид. № 1615464. Топка, 1990 // Б.И. – №47.
9. Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К. Авт. свид. № 1574988. Газогенератор, 1990 // Б.И. – №24.
10. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Джундубаев А.К. Авт. свид. № 1599618. Способ сжигания топлива, 1990 // Б.И. – № 38.
11. Демченко Ю.К., Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В. и др. Авт. свид. № 1627781. Способ сжигания, 1991 // Б.И. – №6.
12. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Джундубаев А.К. и др. Авт. свид. № 1626777. Способ сжигания топлива, 1990.
13. Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Кузнецов Г.Ф. и др. Патент № 2026512. Вертикальная четырехгранная топка для совместного сжигания природного газа и продуктов газификации угля и способ работы топки, 1995 // Б.И. – №1.

14. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Торопов Е.В. и др. Авт. свид. № 1686259. Способ сжигания твердого топлива, 1991 // Б.И. – №39.
15. Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., Жиргалова Т.Б. Авт. свид. № 1719783. Способ сжигания угля в топке котла, 1992 // Б.И. – №10.
16. Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Джундубаев А.К. Авт. свид. № 1746128. Способ сжигания дробленого угля, 1992 // Б.И. – №25.
17. Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Воронин В.П. и др. Патент №2143084. Способ комбинированного сжигания природного газа, угольной пыли и газообразных продуктов термохимической переработки угля, 1999 // Б.И. – №35.
18. Кузнецов Г.Ф., Кондратенко В.В., Дегтярь Б.Г. и др. Авт. свид. № 1698573. Камера сгорания, 1991 // Б.И. – №46.
19. Кузнецов Г.Ф., Осинцев В.В., Лупанов В.Г. Авт. свид. № 1751598. Способ сжигания топлива в топке с кипящим слоем, 1992 // Б.И. – №28.