

На правах рукописи



Михалев Игорь Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ
ПРИ СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ С ОБРАЩЁННЫМ ДУТЬЁМ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в ООО «Энерготехнологическая компания «Сибтермо»
и ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, ст. научный сотрудник
Исламов Сергей Романович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Прошкин Александр Владимирович

кандидат технических наук
Морозов Алексей Борисович

Ведущая организация: **ООО «Научно-исследовательский
и проектно-конструкторский центр
Производственного объединения
«Бийскэнергомаш», г. Барнаул**

Защита диссертации состоится 23 декабря 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ.212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Д 306.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26, Г 274.

Автореферат разослан «23» ноября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В.А. Кулагин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В условиях, когда высокие цены на нефть и газ тормозят дальнейшее развитие мировой экономики, относительно дешевый уголь становится все более популярным энергоносителем. Правительством России в 2008 году была утверждена Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2020 года («Дорожная карта»), согласно которой доля угля в энергетике должна вырасти примерно в полтора раза. В области малой и средней энергетики целесообразно разрабатывать комбинированные схемы производства, позволяющие повысить экологическую безопасность, экономическую и энергетическую эффективность использования углей низкой степени метаморфизма, а также расширить сферу их применения. К новому поколению комбинированных схем производства относится процесс слоевой газификации угля с обращённым дутьём «ТЕРМОКОКС-С», в рамках которого горючая масса угля разделяется на два компонента: газообразный энергоноситель – горючий газ – и высокоактивный коксовый остаток – среднетемпературный кокс.

В настоящем исследовании выполнен комплекс работ по изучению и совершенствованию экологически безопасного процесса переработки угля «ТЕРМОКОКС-С».

Объектом исследования в настоящей работе является теплотехнологическая установка для слоевой газификации угля с обращённым дутьём.

Предмет исследования – комбинированный процесс переработки угля в газообразный энергоноситель и среднетемпературный кокс в слоевом реакторе шахтного типа.

Целью работы является совершенствование теплотехнологического процесса переработки угля в твёрдые и газообразные продукты при слоевой газификации с обращённым дутьём.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие технологии глубокой переработки угля, направленные на получение твёрдых и газообразных продуктов, оценить состояние исследований в данной области;
2. Выполнить критический анализ механизмов тепло- и массопереноса при слоевой газификации угля с привлечением экспериментальных исследований;
3. Выполнить экспериментальное исследование влияния основных управляющих параметров на показатели теплотехнологического процесса;
4. С учётом новых экспериментальных данных усовершенствовать физическую модель процесса, разработать математическую модель, алгоритм численного решения, реализовать математическую модель программно;
5. Выполнить численные эксперименты по исследованию процесса слоевой газификации угля с целью определения влияния отдельных механизмов тепло- и массопереноса на интегральные показатели процесса;
6. Разработать практические рекомендации по совершенствованию процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Для бурого угля экспериментально определены температурная зависимость коэффициента температуропроводности и эффективная кинетика термического разложения в диапазоне режимных условий, используемых в промышленных газификаторах;
2. Получены зависимости влияния расхода дутьевого воздуха, фракционного состава и влажности бурого угля на показатели процесса слоевой газификации с обра-

щённым дутьём, такие как скорость процесса газификации, выход кокса и горючего газа, их характеристики;

3. Определено влияние расхода дутьевого кислорода на показатели процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём, такие как скорость процесса газификации, выход газообразного и твёрдого продуктов процесса, их характеристики. На основе полученных данных разработан новый способ получения синтез-газа и средне-температурного кокса из бурого угля, позволяющий радикально снизить себестоимость синтетических углеводородных топлив;

4. Выполнен анализ всех стадий процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём, на основе которого усовершенствована физическая и разработана математическая модели процесса. С помощью математической модели выполнено численное исследование процесса.

Практическая значимость:

1. На примере угля марки Б2 разреза «Бородинский» (Красноярский край) определены границы целесообразных режимов переработки бурого угля в газообразный энергоноситель (горючий газ) и среднетемпературный кокс в промышленных теплотехнологических установках на основе процесса «ТЕРМОКОКС-С»;

2. В широком диапазоне расходов дутьевого воздуха и дутьевого кислорода, а также для различных фракционного состава и влажности бурого угля получены корреляционные соотношения показателей процесса газификации (скорость процесса, производительность реактора по газу и твёрдому продукту, их характеристики), которые приняты для использования в качестве расчётных формул при проектировании промышленных теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС»;

3. Разработан и защищён патентом РФ способ получения синтез-газа и средне-температурного кокса в слоевом реакторе с обращённым кислородным дутьём, который предназначен для применения в составе промышленных комплексов по производству синтетических углеводородных топлив и продуктов на основе среднетемпературного кокса из бурого угля;

4. Разработаны и программно реализованы универсальные методики обработки данных стендовых испытаний по слоевой газификации угля с обращённым воздушным, кислородным и обогащённым дутьём, используемые с целью получения исходных данных для проектирования промышленных теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС» (основных технологических показателей процесса, его материального и теплового балансов);

5. Разработаны практические рекомендации по совершенствованию процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём, позволяющие улучшить эксплуатационные характеристики существующих и проектируемых теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС».

Личный вклад автора состоит в самостоятельном анализе литературных и экспериментальных данных, подготовке и непосредственном проведении экспериментов по газификации, определению коэффициента температуропроводности и эффективной кинетики термического разложения бурого угля, разработке и реализации математической модели процесса, проведении численных экспериментов и разработке технических предложений по интенсификации и расширению сферы применения процесса «ТЕРМОКОКС-С», совершенствовании методического обеспечения экспериментальных исследований и технологического тестирования углей с целью подготовки исходных данных для проектирования промышленных теплотехнологических ус-

тановок. Автор выражает благодарность коллективу Красноярского филиала Института теплофизики СО РАН под руководством А.А. Дектерёва и лично А.В. Минакову за консультации по численной методике и А.А. Гаврилову за предоставление программы Draw 2D Surface для визуализации расчёта.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается корректным использованием теоретических и экспериментальных методов обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований. Теоретические положения работы основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, сопряженных с предметом исследования, а также на собственных экспериментальных данных и данных исследований, представленных в известных работах других авторов.

Реализация результатов работы. Все практически значимые результаты диссертационной работы (методики обработки данных стендовых испытаний, практические рекомендации по совершенствованию процесса и др.) приняты компанией «Сибтермо» для использования при проектировании промышленных теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы обсуждены и доложены на III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (г. Екатеринбург, 2007 г.), XV Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных, (г. Кемерово, 2009 г.), VI Всероссийской конференции молодых учёных (г. Санкт-Петербург, 2009 г.), VI Всероссийском теплофизическом семинаре вузов по теплофизике и энергетике (г. Красноярск, 2009 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, и 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных литературных источников и 8 приложений. Работа содержит 226 страниц машинописного текста, в том числе 145 страниц основного текста диссертации и 81 страницу приложений, 69 рисунков и 75 таблиц. Список использованных источников включает 92 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость результатов, а также приведено краткое содержание работы по главам.

Первый раздел посвящён обзору существующих технологических процессов переработки угля, сравнительному анализу их преимуществ и недостатков, определению областей их практического применения.

В процессах слоевой газификации угля наиболее широко распространённой является схема с прямым дутьём (рис. 1), самый яркий пример которой – технология газификации под давлением «Lurgi». Это одна из наиболее отработанных и распространённых технологий газификации в мире. Аналогичный «Lurgi» процесс ранее был реализован при атмосферном давлении в стационарном слое.



Рисунок 1 – Схема процесса слоевой газификации с прямым дутьём



Рисунок 2 – Схема процесса слоевой газификации с обращённым дутьём

Преимущества данного способа газификации обусловлены интенсивной передачей тепла с газом от зоны горения к свежему углю. При этом снижаются удельные расходные показатели и повышается общая эффективность процесса. В то же время конденсированные продукты пиролиза угля (масло, смола, фенолы) загрязняют продуктовый газ. Необходимость очистки газа усложняет и удорожает установку газификации, её использование становится оправданным лишь при очень крупных масштабах производства. В данном процессе возможна только полная газификация угля.

Единственным примером технологий с обращённым дутьём является слоевой процесс «ТЕРМОКОКС». В отличие от схемы с прямым дутьём, производимый в данном процессе газ не содержит конденсированных продуктов пиролиза угля. Кроме того, схема с обращённым дутьём позволяет, в зависимости от режима работы газификатора, производить из исходного угля два ценных продукта: газообразный энергоноситель (горючий газ) и/или среднетемпературный кокс. Этими факторами обусловлен высокий уровень экологической безопасности и экономической эффективности данного процесса.

Общая схема процесса представлена на рисунке 2. В вертикальный реактор шахтного типа загружается дроблёный уголь. Зажигание осуществляется сверху с помощью электрических нагревателей, установленных в крышке аппарата. Дутьё подается снизу через колосниковую решетку, при этом формируется зона физико-химических превращений (ФХП), которая перемещается по высоте слоя угля от участка зажигания навстречу газовому потоку (волна ФХП). Возможны варианты исполнения реактора со стационарным и движущимся слоем угля. Технология применима для любых неспекающихся, преимущественно молодых углей.

Первое промышленное предприятие на основе процесса «ТЕРМОКОКС-С» для производства бурого угольного кокса и энергетического газа было построено компанией «Сибтермо» в 1996 году в г. Красноярске. Это – завод активированных углей ЗАО «Сорбентуголь» мощностью около 40 тыс. тонн угля в год (с 2000 года – ЗАО «Карбоника-Ф»). В 2008 году сдан в эксплуатацию завод по производству бытовых топливных брикетов из среднетемпературного кокса в Монголии; кроме того, на основе процесса «ТЕРМОКОКС-С» работают небольшие установки для сушки зерна в Красноярском крае.

По сравнению со схемой газификации с прямым дутьём в схеме с обращённым дутьём скорость волны ФХП и, соответственно, производительность газификатора при прочих равных условиях оказывается существенно (на порядок) бо-

лее низкой. Именно это обстоятельство практически свело к нулю интерес к использованию обращённого дутья в первой половине XX века, когда технологии переработки угля развивались наиболее бурно.

В то же время только технология «ТЕРМОКОКС-С» способна при сравнительно низких капитальных затратах, простоте аппаратного оформления и возможности использования дешёвого сырья обеспечить экологически безопасное производство с помощью одного и того же газификатора двух полезных продуктов (в том числе одновременно). Этим обусловлен интерес к данной технологии в регионах мира, где имеются дешёвые бурые угли и требуются энергетические установки малой и средней мощности, поскольку в таких случаях производство тепловой и/или электрической энергии за счёт продажи кокса, пригодного для производства формованного кокса металлургического назначения и бездымного бытового топлива, может быть условно бесплатным. При наличии в регионе соответствующего дешёвого топлива технология «ТЕРМОКОКС-С» может быть использована для замещения газообразным энергоносителем из бурого угля более дорогих природного газа и дизельного топлива в электрогенерирующих установках при сохранении высоких показателей экологической безопасности работы генерирующих комплексов.

Сравнительно недавнее возрождение интереса к процессу слоевой газификации угля с обращённым дутьём ещё не позволило глубоко изучить его механизм и полностью раскрыть его технико-экономический потенциал. В настоящей работе ставится задача исследования данного процесса с целью нахождения способов его совершенствования.

По результатам обзора поставлены задачи исследования.

Во **втором разделе** рассмотрены процессы тепло- и массопереноса при слоевой газификации угля с обращённым дутьём. Выделены основные управляющие параметры изучаемого процесса.

Нагрев новых слоёв топлива при перемещении зоны ФХП в реакторе обусловлен, прежде всего, переносом тепла по твёрдой фазе. Получение достаточно надёжных данных о коэффициенте температуропроводности самих угольных частиц чрезвычайно важно как для понимания его роли в суммарном переносе тепла по засыпке, так и для оценки характерного времени прогрева частиц различного размера, определяющего, в частности, кинетические характеристики термического разложения вещества угля. В литературных источниках, где приводятся теплофизические характеристики топлив, как правило, недостаточно подробно указываются условия проведения экспериментов либо эти условия сильно отличаются от условий рассматриваемого процесса. Отсутствие в опубликованных результатах исследований надёжных и адекватных рассматриваемым условиям данных о температурной зависимости коэффициента тепло-/температуропроводности бурых углей привело к необходимости проведения экспериментов по изучению данной характеристики топлива. В качестве сырья был использован уголь марки Б2 разреза «Бородинский» Канско-Ачинского угольного бассейна (Красноярский край). Данный уголь был выбран основным сырьём в настоящем исследовании, поскольку он является наиболее представительным для Канско-Ачинского бассейна – перспективной сырьевой базы для переработки угля. Усреднённый технический и элементный состав угля, использованного в экспериментах, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики угля марки Б2 разреза «Бородинский»

W^r	A^d	V^{daf}	C^{daf}	O^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	Q_i^r
27,0%	5,5%	47,0%	73,0%	20,9%	4,9%	0,9%	0,2%	18,2 МДж/кг

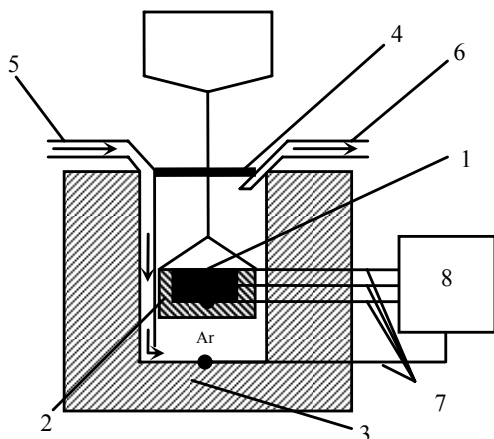


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки для исследования температуропроводности угольных частиц: 1 – образец; 2 – теплоизолирующая форма; 3 – лабораторная электропечь; 4 – изолирующая крышка; 5, 6 – патрубки для подачи и отвода аргона; 7 – термопары; 8 – блок регистрации температур

В экспериментах осуществлялся односторонний нагрев одиночных образцов рядового угля размером $50 \times 50 \times 30$ мм до температур 873–1273 К, наиболее характерных для процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём. Для устранения ошибки, связанной с учётом тепла от сгорания летучих, идущего на нагрев образца, нагрев осуществлялся в инертной среде аргона. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.

В образец на глубине 0, 7, 15 и 30 мм от нагреваемой поверхности вводились термопары, с помощью которых в блоке регистрации температур велась запись термограммы прогрева частицы. Процесс нагрева продолжался до тех пор, пока температура изолированной поверхности образца не достигала температуры в камере печи.

В результате были получены экспериментальные термограммы, на основе которых посредством решения известной т.н. обратной коэффициентной задачи теплопроводности (ОКЗТ) была построена кусочно-постоянная аппроксимация зависимости коэффициента температуропроводности от температуры (рис. 4). Полученная зависимость применима в интервале 273–1173 К.

Линейная скорость прогрева частицы до температур 973–1173 К при полученных значениях коэффициента температуропроводности угля составляет приблизительно 10^{-5} м/с, то есть около 3 см/ч.

Так как реальная засыпка не является монолитной, скорость волны ФХП при кондуктивной передаче тепла по конденсированной фазе должна быть существенно меньше этого значения. В то же время в промышленных процессах производства среднетемпературного кокса (фракция угля 5–15 мм) скорость волны ФХП составляет 15–17 см/ч. Следовательно, роль кондуктивной теплопередачи между частицами в рассматриваемом процессе

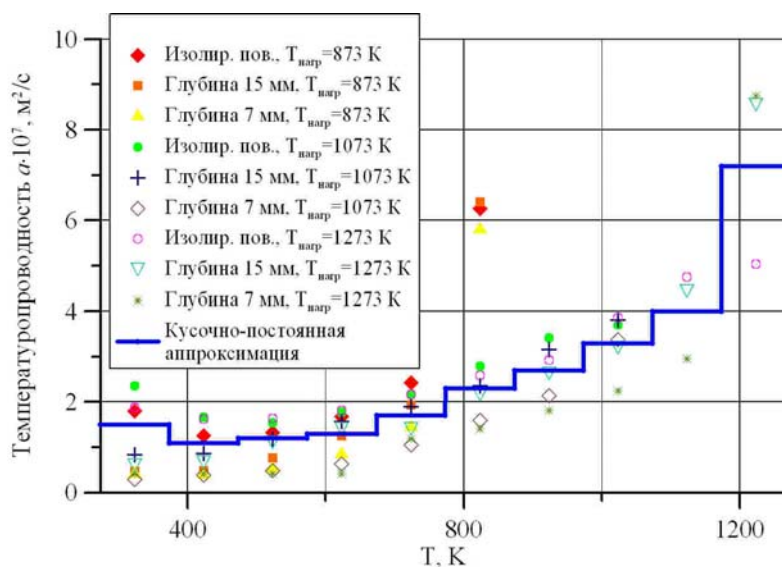


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента температуропроводности бурого угля от температуры

очень мала. Так как при слоевой газификации угля с обращённым дутьём встречный поток газа по существу исключает конвективный механизм нагрева частиц впереди фронта волны ФХП, превалирующим механизмом переноса тепла между частицами в направлении движения волны ФХП является лучистый теплообмен.

Ещё один ключевой фактор процесса – поступление горючих компонентов из угля в газовый поток при термической деструкции топлива. Этот фактор наряду со скоростью подачи окислителя в реакционную зону является одним из определяющих для тепловыделения в реакторе, поскольку обеспечивает экзотермическое газофазное реагирование топлива с окислителем. В опубликованных результатах исследований не содержится надёжной информации о кинетических параметрах термического разложения угля в диапазоне температур до 1173 К для частиц размером от 1 до 50 мм, наиболее характерных для процесса слоевой газификации бурого угля с обращённым дутьём. Имеющиеся данные по частицам размером до 1 мм неоднозначны, отличаются большим разбросом значений у разных авторов и не могут быть использованы в практических расчётах применительно к рассматриваемому процессу, чтобы получить достаточную для практики надёжность результатов. Необходимые кинетические параметры были получены из экспериментов, организованных в условиях, соответствующих изучаемому процессу.

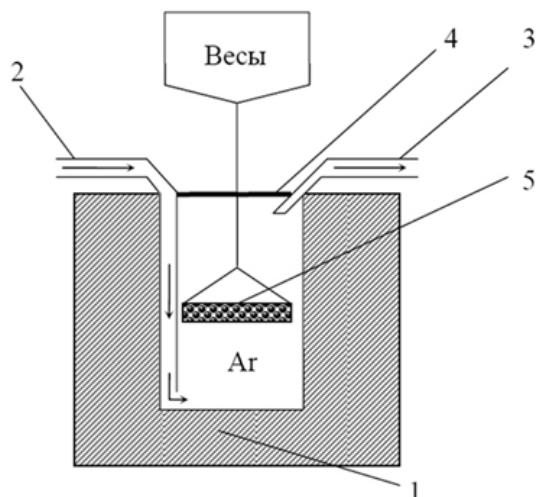


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки для изучения кинетики термического разложения угля:
1 – лабораторная электропечь; 2,3 – трубки для подачи и отвода аргона; 4 – крышка печи; 5 – кварцевая трубка с навеской

Для определения кинетики термического разложения угля была выполнена серия экспериментов по нагреву угольных навесок в лабораторной печи с инертной средой при температурах, характерных для процесса слоевой газификации угля. В качестве исследуемого материала были использованы угольные частицы трёх размеров: 2,5–3, 4,5–5, 6–6,5 мм. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5. Графическое представление экспериментальных данных показало, что для всех исследованных размеров частиц угля и температур греющей среды текущая плотность навески имеет близкую к линейной зависимость от времени. При различных температурах греющей среды изменяются только тангенс угла наклона прямой и конечная масса навески. Выявлено, что динамика изменения относительной плотности в пределах по-

грешности измерений зависит только от температуры греющей среды и не зависит от размера частиц. Зависимость безразмерной относительной плотности частиц $N = (\rho - \rho_{кон}) / (\rho_{нач} - \rho_{кон})$ от времени нагрева для исследованных температур и размеров частиц имеет следующий вид:

$$N = K(T_n) \cdot \tau + 1, \quad (1)$$

где τ – время нагрева, с; $K(T_n) = 0,0125 - 3,05 \cdot 10^{-5} \cdot T_n$ – тангенс угла наклона прямых, зависящий от температуры греющей среды T_n . Выражение (1) аппроксимирует экспериментальные данные с коэффициентом корреляции 0,95. Конечная плотность частиц описывается зависимостью $\rho_{кон} = (0,76 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot T_n) \cdot \rho_{нач}$.

Основными управляющими параметрами процесса «ТЕРМОКОКС-С» являются расход подаваемого в реактор дутья и содержание в нём кислорода, а также фракционный состав и влажность угля.

Третий раздел посвящён экспериментальному исследованию влияния управляющих параметров на показатели теплотехнологического процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём. Приведена схема экспериментального стенда, а также методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных. Выполнен анализ результатов экспериментальных исследований.

В экспериментах использован реактор периодического действия диаметром 300 мм. Для измерения температуры в слое угля внутри засыпки равномерно с шагом 180 мм стационарно размещены 7 защищённых хромель-алюмелевых термопар с диаметром термочувствительного элемента 5,3 мм (диаметр защитного кожуха – 20 мм) так, чтобы термочувствительный элемент располагался на оси канала реактора. В процессе работы реактора выполнялся непрерывный анализ продуктового газа. Для каждого эксперимента выполнялся анализ исходного угля и твёрдого остатка газификации. Было исследовано влияние управляющих параметров на следующие показатели процесса газификации: скорость движения тепловой волны (температурной проекции волны ФХП) по слою угля, скорость потери массы угля (скорость процесса газификации), удельный выход, химический состав и удельная теплота сгорания производимого газа, выход твёрдого остатка газификации и его удельная теплота сгорания, максимальные температуры в реакторе.

Для обработки экспериментальных данных автором была разработана специализированная программа, впоследствии внедрённая в качестве стандартного инструмента для обработки данных стендовых испытаний при подготовке исходных данных для проектирования промышленных теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС». В программу заложены две методики расчёта: для азотно-кислородного (чисто воздушного или обогащённого кислородом) и для чисто кислородного дутья. В первом случае расчёт ведётся на основе материального баланса эксперимента по азоту, во втором – по углероду.

Для оценки влияния фракционного состава угля и расхода дутьевого воздуха на показатели процесса использованы узкие фракции 1–3, 3–5 и 5–8 мм (далее – «фракции»), а также широкая фракция 3–10 мм (далее – «полифракция»). Размеры частиц выбраны из соображений минимизации их термического сопротивления. Эксперименты проводились при стандартных условиях (293 К, 0,1 МПа), исследованный диапазон расходов дутьевого воздуха охватывает область режимов от частичной до полной газификации угля: $0,022 \div 0,125 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Для сравнения были рассмотрены соответствующие показатели промышленного процесса производства кокса на заводе ЗАО «Карбоника-Ф» (фракция 5–15 мм).

На рисунке 6 показана зависимость скорости процесса слоевой газификации

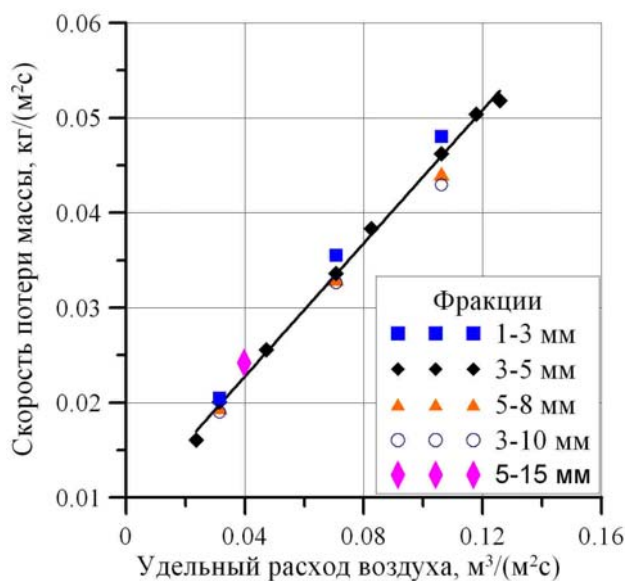


Рисунок 6 – Зависимость скорости процесса слоевой газификации от расхода воздушного дутья и фракционного состава угля

от расхода воздушного дутья и фракции угля. Из приведённой зависимости следует, что скорость процесса линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха. Она слабо зависит от фракционного состава угля: значения скорости процесса для исследованных фракций во всём исследованном диапазоне расходов дутьевого воздуха практически укладываются в коридор погрешности. Одновременно со скоростью потери массы при повышении расхода дутьевого воздуха увеличивается и скорость тепловой волны. Важно отметить, что скорость тепловой волны при одинаковом расходе дутьевого воздуха возрастает с уменьшением размера фракции. Это не противоречит слабой зависимости суммарной скорости процесса от фракционного состава угля, поскольку скорость тепловой волны, по сути, определяет соотношение между массами газового и твёрдого продуктов процесса.

Удельный выход горючего газа линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха и не зависит от фракционного состава угля (рис. 7). Удельная теплота сгорания газа в случае мелких фракций и полифракции имеет максимум в области больших расходов дутьевого воздуха, чем в случае крупной фракции. Это означает, что использование мелкой фракции позволяет получить более калорийный газ при большем расходе дутьевого воздуха, чем в случае крупной фракции.

На рисунке 8 показана зависимость выхода твёрдого остатка газификации от расхода дутьевого воздуха и фракционного состава угля. Из приведённой зависимости следует, что при низких значениях расхода дутьевого воздуха (приблизительный диапазон $0,022 \div 0,047 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) реализуется режим карбонизации, то есть частичной газификации исходного угля: выход твёрдого остатка (кокса) в этом случае максимален. Теплота сгорания кокса в этом диапазоне расходов дутьевого воздуха также максимальна, кокс характеризуется низким остаточным выходом летучих (до 10%). Данный диапазон расходов следует использовать при промышленном производстве среднетемпературного кокса. Попутно производимый горючий газ пригоден для сжигания в газовых котлах, газопоршневых машинах с целью получения тепловой и/или электрической энергии.

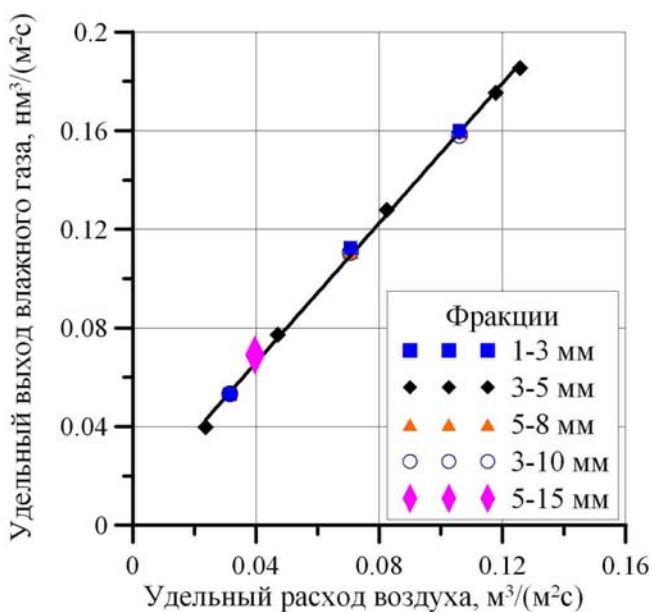


Рисунок 7 – Зависимость выхода продуктового газа от расхода воздушного дутья и фракционного состава угля

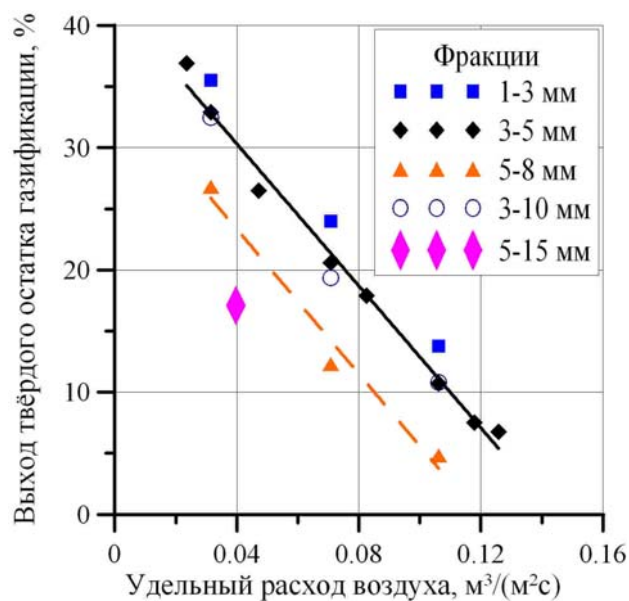


Рисунок 8 – Зависимость выхода твёрдого остатка газификации (в % от массы угля) от расхода воздушного дутья и фракционного состава угля

При высоких значениях расхода дутьевого воздуха (приблизительный диапазон $0,100 \div 0,125 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) реализуются режимы, близкие к полной газификации угля: в этих режимах достигается максимальный выход горючего газа и максимум его удельной теплоты сгорания. Целевым продуктом в этом диапазоне расходов дутьевого воздуха можно считать только горючий газ, поскольку твёрдый остаток газификации представляет собой золу с небольшим количеством остаточного углерода. Данный диапазон расходов следует использовать при промышленном производстве горючего газа для его сжигания в газовых котлах, газопоршневых машинах с целью получения тепловой и/или электрической энергии.

Таким образом, в исследованном диапазоне удельных расходов дутьевого воздуха выявлены две зоны целевых режимов осуществления теплотехнологического процесса: зона карбонизации угля, то есть целевого производства кокса с попутным производством газообразного энергоносителя, а также зона газификации угля, то есть целевого преобразования угля в газообразный энергоноситель (рис. 9). Между этими зонами находится промежуточный диапазон расходов дутьевого воздуха, при которых твёрдый остаток и горючий газ производятся в соизмеримых количествах. Однако и физико-химические характеристики, и удельные выходы обоих продуктов сравнительно невысоки, поэтому работа промышленных газификаторов в этих режимах нецелесообразна.

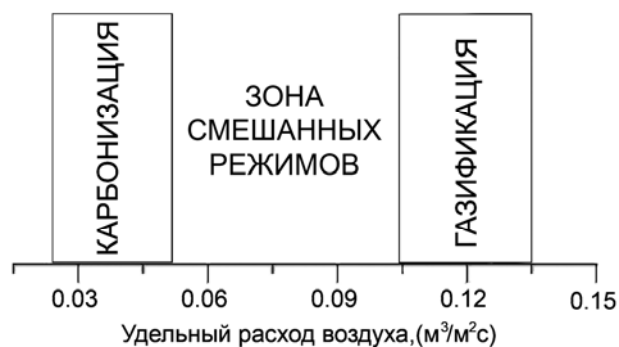


Рисунок 9 – Диаграмма режимов работы газификатора на воздушном дутье

Сопоставление экспериментальных данных по кинетике термического разложения угля и его слоевой газификации на воздушном дутье позволяет сделать важный вывод относительно физико-химических процессов в зоне восстановления в режимах карбонизации. Существует гипотеза о том, что на стадии сушки и пиролиза из угля выходят влага и органическая масса (летучие), а в зоне восстановления при гетерогенном реагировании газифицируется чистый углерод. Тогда приблизительно 50% массы, которые твёрдая фаза теряет при сушке и пиролизе, должны содержать всю влагу, весь водород, азот, кислород, которые топливо теряет в процессе карбонизации, а остальная потеря массы (от 13 до 23% массы исходного угля) должна приходиться только на углерод. Однако полученные экспериментальные данные показывают, что в зоне восстановления реагирование газифицирующих агентов происходит не только с чистым углеродом, но и с остаточными летучими, которые представлены конденсированными углеводородными соединениями. Косвенно это подтверждается тем, что даже буроугольный сорбент после очень глубокой проработки пор имеет остаточное содержание летучих (приблизительно 5% в пересчёте на сухую беззольную массу).

В результате экспериментального исследования установлено, что предварительная сушка бурого угля (снижение влажности примерно до 10%) и повышение расхода дутьевого воздуха в 3,8 раза в совокупности приводят к почти трёхкратному ускорению процесса карбонизации, увеличению выхода среднетемпературного кокса в 1,3 раза и повышению удельной теплоты сгорания горючего газа на 20%. Сравнение показателей процесса на рядовом и подсушенном угле выполнено для режимов производства кокса одинаковой зольности. Результаты сравнения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные показатели процесса производства среднетемпературного кокса при использовании рядового и подсушенного углей

Параметр	Рядовой уголь	Подсушенный уголь
Удельный расход дутья, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,031	0,118
Скорость потери массы, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,020	0,056
Скорость тепловой волны, см/ч	18,6	48,3
Удельный выход влажного газа на поперечное сечение аппарата, $\text{нм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,053	0,183
Удельный выход влажного газа, $\text{нм}^3/\text{кг}$ угля	1,77	1,80
Удельный выход кокса, $\text{кг}/\text{кг}$ угля	0,33	0,44
Удельная теплота сгорания влажного газа, $\text{МДж}/\text{нм}^3$	2,19	2,63

В экспериментах по изучению влияния расхода дутьевого кислорода на показатели процесса была использована фракция угля 3–5 мм. В качестве дутья использовался технический кислород. Эксперименты проводились при нормальных условиях (273 К, 0,1 МПа), изученный диапазон расходов кислорода $0,015 \div 0,048 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

При замене воздушного дутья кислородным скорость процесса слоевой газификации возрастает примерно в 7 раз (см. рис. 10 и 6). Одновременно с газом, удельный выход которого, как и в случае использования воздушного дутья, линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого кислорода (рис. 11), во всём изученном диапазоне расходов производится постоянное и сравнительно большое количество среднетемпературного кокса (рис. 12). Остаточный выход летучих из получаемого кокса в основном невысок (около 10%), кокс обладает достаточно высокой – и примерно постоянной – удельной теплотой сгорания (около 25 МДж/кг). Удельная теплота сгорания газа с увеличением расхода дутьевого кислорода также остаётся примерно постоянной.

На основе полученных данных по слоевой газификации бурого угля с обращённым кислородным дутьём разработан новый технологический процесс, получивший название «ТЕРМОКОКС- O_2 ». На данный способ газификации получен патент РФ. Газ, получаемый в данном процессе, практически не содержит азота, что открывает возможность его использования (после несложной переработки) в качестве синтез-газа при производстве синтетических углеводородов, включая жидкое топливо. Твёрдый продукт газификации, обладающий сравнительно высокой удельной теплотой сгорания и низким выходом летучих, пригоден для производства формованного кок-

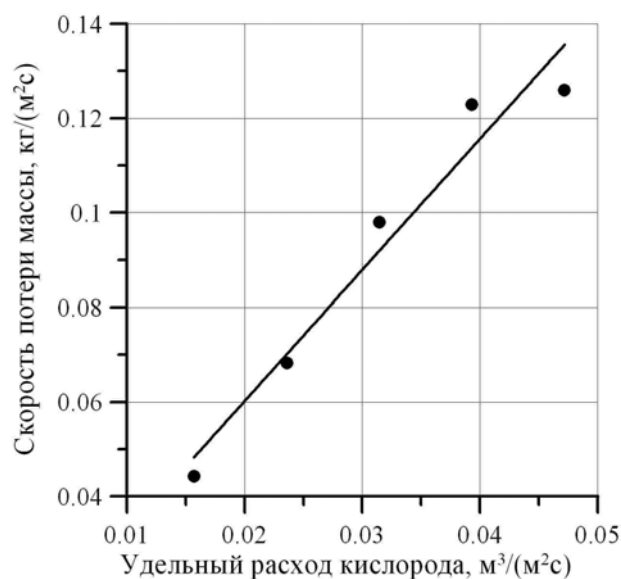


Рисунок 10 – Зависимость скорости процесса от расхода кислородного дутья

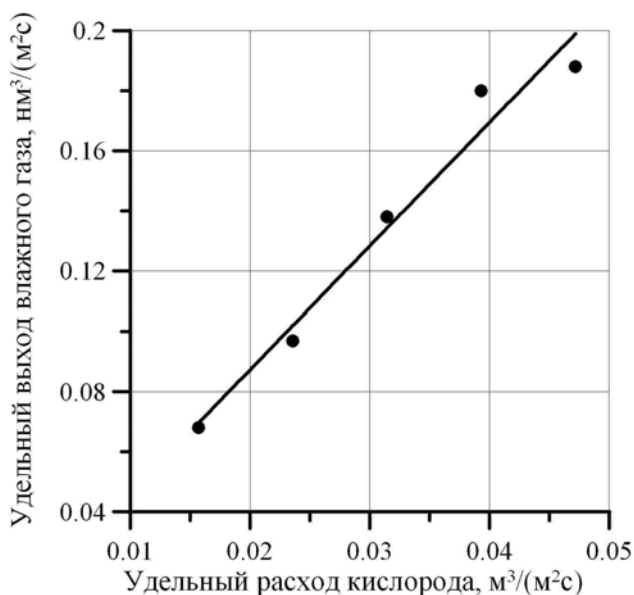


Рисунок 11 – Зависимость выхода влажного газа от расхода кислородного дутья

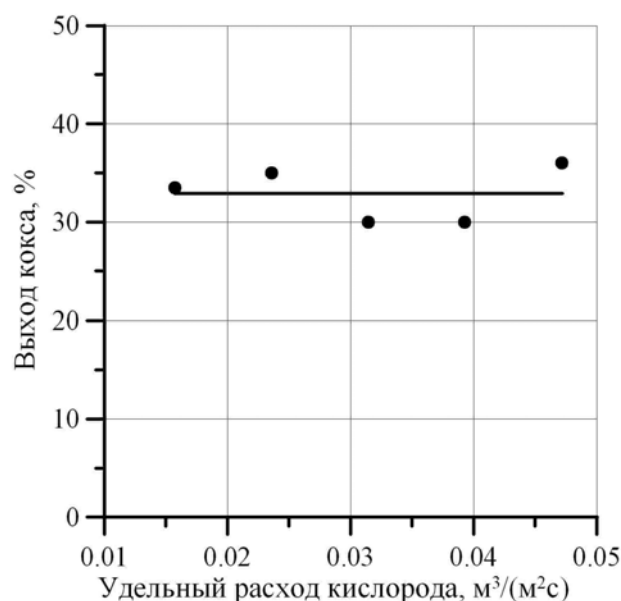


Рисунок 12 – Зависимость выхода кокса от расхода кислородного дутья

са металлургического назначения и бездымного бытового топлива. В настоящее время переработка угля в углеводородные продукты сдерживается из-за высокой себестоимости кислородной газификации. В отличие от классического производства в новом комбинированном процессе производится второй ценный продукт, продажа которого радикально снижает себестоимость синтез-газа. Это открывает новые возможности для преобразования бурого угля в синтетические углеводородные топлива.

Четвёртый раздел посвящён моделированию процесса слоевой газификации угля с обращенным дутьём. С учётом новых экспериментальных данных усовершенствована физическая модель процесса, разработана математическая модель, приведены описание численного алгоритма, порядок определения параметров и проверки адекватности математической модели. Выполнены численные эксперименты.

Использование модели позволяет провести разделение сложного процесса тепло- и массопереноса при слоевой газификации угля с обращенным дутьём на составляющие простые процессы. При построении модели рассматривались режимы карбонизации бурого угля и случай частиц небольших размеров (меньше 10^{-2} м).

Физическая модель процесса предполагает разделение зоны ФХП на две части: зону сушки, выделения и горения летучих (сокращённо – зону горения) и зону восстановления. В зоне горения используется полученная в настоящей работе эффективная кинетика термического разложения бурого угля. В зоне восстановления происходит гетерогенное реагирование газифицирующих агентов с коксовым остатком, скорость потери массы описывается уравнениями эффективной кинетики, коэффициенты в которых определены с привлечением экспериментальных данных.

Газофазное реагирование в модели описывается с помощью брутто-реакций горения углерода и водорода (исходя из элементного состава летучих), а также реакции водяного газа $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$. Реактор в модели адиабатический. Механизм передачи тепла между частицами в направлении против потока газа радиационный, для его описания используется эффективный коэффициент теплопроводности, кубически зависящий от температуры (А.Ф. Чудновский).

Основные уравнения модели выглядят следующим образом:

$$(1 - \omega) \frac{\partial(c_k \rho_k T_k)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{rad} \frac{\partial T_k}{\partial z} \right) - (1 - \omega) \frac{\partial \rho_k}{\partial \tau} \cdot \Delta H_k + \alpha S_{y0} (T_z - T_k), \quad (2)$$

$$\omega \frac{\partial(c_z \rho_z T_z)}{\partial \tau} = (1 - \omega) \frac{\partial \rho_k}{\partial \tau} \cdot \Delta H_k + Q_P - \frac{\partial(u_z c_z \rho_z T_z)}{\partial z} - \alpha S_{y0} (T_z - T_k), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial \tau} = Y(T_k), \quad (4)$$

$$\omega \frac{\partial v_j \rho_z}{\partial \tau} = G_j - \frac{\partial(v_j \rho_z u_z)}{\partial z}, \quad j = H_2, CO, CO_2, H_2O, N_2, O_2. \quad (5)$$

В выражениях (2)–(5) индекс «к» относится к конденсированной фазе, «z» – к газовой; ω – порозность засыпки; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ_{rad} – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ΔH_k – удельное изменение энтальпии частиц при фазовых переходах и гетерогенном реагировании, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи от газа к конденсированной фазе, Вт/(м²·К); S_{y0} – удельная контурная поверхность частиц, м²/м³; Q_P – тепловой эффект химического реагирования, Вт/м³; u_z – линейная скорость фильтрации газа, м/с; Y – функция изменения массы конденсированной фазы за счёт сушки и пиролиза или гетерогенного реагирования, кг/с; v_j – мольные доли компонентов газовой смеси; G_j – источник массы компонента газовой смеси, обусловленный потерей массы частицами и химическим реагированием в газовой фазе, кг/(м³·с). Система уравнений (2)–(5) замыкается уравнениями состояния и неразрывности для газа, а также выражениями, описывающими кинетику термического разложения угля и химическое реагирование. Для определения состава газовой смеси с использованием реакции водяного газа при недостатке окислителя применяется известная равновесная методика.

Для численного решения системы уравнений математической модели разработана неявно-явная разностная схема с разделением по физическим процессам. Численный алгоритм реализован в среде Microsoft Visual C++.

В качестве базового режима при параметрическом исследовании модели был использован режим карбонизации угля при удельном расходе дутьевого воздуха 0,031 м³/(м²·с). Сопоставление данных расчёта и натурального эксперимента в этом режиме приведено в таблице 3. В численном расчёте использовалась модель адиабатического реактора, однако получено хорошее совпадение расчётных показателей с экспериментальными. Это связано с тем, что теплотери в реальном экспериментальном газификаторе сказываются только вблизи стенки и выхода из реактора, и если рассмотреть распространение волны ФХП в реальной засыпке вблизи центра канала, где расположены спаи термопар, условия протекания процесса будут аналогичны модельным. Так как в модели не учитываются реакции образования метана, близкое к экспериментальному значение удельной теплоты сгорания газа обусловлено в расчёте повышенным по сравнению с натурным экспериментом содержанием в газовой смеси CO и H₂. Этим обусловлено несовпадение значений содержания ряда компонентов в газовой смеси (табл. 3).

Математическая модель была разработана, в первую очередь, для исследования влияния различных физико-химических механизмов, составляющих сложный процесс слоевой газификации угля с обращённым дутьём, на интегральные показатели последнего. Было изучено влияние эффективного коэффициента теплопроводности,

Таблица 3 – Сопоставление показателей в численном и натурном экспериментах

Параметр	Расчёт	Эксперимент
Скорость потери массы, кг/(м ² ·с)	0,019	0,020
Скорость тепловой волны, см/ч	18,3	18,6
Максимальная температура, К	961 (тв.ф.)	953
Удельный выход влажного газа, нм ³ /(м ² ·с)	0,053	0,053
Удельный выход твёрдого остатка, кг/кг угля	0,356	0,33
Средний состав влажного газа, об. %		
<i>H₂</i>	16,9	14,2
<i>CO</i>	5,0	3,0
<i>CO₂</i>	15,3	15,1
<i>CH₄</i>	–	0,8
<i>H₂O</i>	18,2	22,2
<i>N₂</i>	44,6	44,7
Удельная теплота сгорания влажного газа, МДж/нм ³	2,46	2,19

параметров кинетики потери массы конденсированной фазой, теплоотдачи от газа к частицам. Также были выполнены численные эксперименты с повышенной влажностью топлива, с кислородным дутьём, с подогревом дутьевого воздуха.

Использование в модели нелинейно зависящего от температуры эффективного коэффициента теплопроводности вместо постоянного значения этого параметра приводит к существенному изменению характера нагрева засыпки. Нагрев при использовании постоянного значения плавный: такой характер нагрева не соответствует визуально наблюдаемой в экспериментах резкой передней границе высокотемпературной области. Характер нагрева, полученный при использовании нелинейно зависящего от температуры эффективного коэффициента теплопроводности, более реалистичен.

Эффективный коэффициент теплопроводности определяет интенсивность передачи тепла из зоны горения в направлении против потока газа. При его увеличении частицы перед высокотемпературной областью интенсивнее нагреваются от неё, что приводит к увеличению скорости тепловой волны; повышается интегральная скорость процесса. При этом за счёт увеличения оттока тепла из высокотемпературной области снижается максимальная температура конденсированной фазы.

При увеличении скорости термического разложения частицы угля перед высокотемпературной областью, вступая в стадию сушки и пиролиза, более интенсивно теряют массу. Это приводит к усилению их разогрева за счёт окисления горючих компонентов летучих и увеличению скорости тепловой волны. В то же время увеличивается потребление окислителя впереди высокотемпературной области, что приводит к уменьшению в ней локального коэффициента избытка окислителя и, как следствие, к снижению максимальной температуры конденсированной фазы. Необходимо отметить конкурирующее влияние эффективной теплопроводности и кинетики термического разложения на скорость тепловой волны. С одной стороны, за счёт ускорения термического разложения угля увеличивается поступление горючего (летучих) в газовую фазу впереди высокотемпературной области, что приводит к увеличению скорости тепловой волны и снижению максимальной температуры конденсированной фазы. С другой стороны, при снижении максимальной температуры конденсированной фазы уменьшаются сильно зависящий от температуры эффективный коэффициент тепло-

проводности и интенсивность нагрева впередилежащих частиц от высокотемпературной области, что ведёт к снижению скорости тепловой волны.

Численное исследование показало, что подогрев дутьевого воздуха до 473 К приводит к увеличению скорости тепловой волны в 1,6 раза и небольшому снижению максимальной температуры конденсированной фазы. В результате снижения максимальной температуры и времени переработки частиц (за счёт более высокой скорости волны) увеличивается примерно на 16% (отн.) выход кокса. Удельная теплота сгорания кокса при этом составляет около 30 МДж/кг. Таким образом, подогрев дутьевого воздуха приводит к увеличению скорости процесса и повышению производительности реактора по коксу. Следует отметить, что диапазон целесообразных значений данного управляющего параметра в процессе слоевой газификации угля с обращённым дутьём ограничен, поскольку при температуре дутьевого воздуха выше критического значения, достаточного для зажигания, обратная тепловая волна превратится в прямую и радикально изменится схема процесса.

Переход в модели к кислородному дутью (расход кислорода остаётся тем же, но из дутья исключается азот) приводит к увеличению скорости движения тепловой волны на 43% и повышению удельной теплоты сгорания газа примерно вдвое. Натурные эксперименты с кислородным дутьём демонстрируют аналогичный эффект.

В пятом разделе на основе полученных данных разработаны практические рекомендации по проектированию теплотехнологических установок для полной или частичной газификации угля на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС». Обобщены имеющиеся сведения о механизме изучаемого процесса, выделены ключевые вопросы для дальнейших исследований.

Разработаны следующие практические рекомендации для использования при проектировании отдельных газификаторов и проектировании теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС».

1. Для целей комбинированной безотходной переработки бурого угля в средне-температурный кокс и газообразный энергоноситель (горючий газ) следует использовать диапазон значений удельного расхода дутьевого воздуха $0,022 \div 0,047 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (режимы карбонизации). Горючий газ в этом случае является побочным продуктом, он рекомендуется для экологически чистого сжигания в газовых котлах, газопоршневых машинах с целью получения тепловой и/или электрической энергии. При использовании в качестве сырья бурого угля, практически вне зависимости от его фракционного состава, получаемый кокс – мелкозернистый, поэтому, как правило, требуется введение стадии брикетирования (формованный кокс, бездымное бытовое топливо). Так как использование мелкофракционного угля приводит к повышению производительности процесса по коксу, целесообразно использовать мелкую фракцию угля (3–5 мм). Использование крупной фракции имеет смысл только для углей марки Д, когда твёрдым продуктом является преимущественно кокс класса орех.

2. Для увеличения производительности реактора в режимах карбонизации следует использовать предварительную сушку угля с повышением расхода дутьевого воздуха, а также подогрев дутьевого воздуха, но не выше температуры зажигания угля.

3. Работа газификатора с удельными расходами дутьевого воздуха $0,047 \div 0,100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, характерными для зоны смешанных режимов, не рекомендуется, поскольку получаемые продукты имеют сравнительно невысокие характеристики.

4. Для целевого преобразования бурого угля в газообразный энергоноситель следует использовать диапазон значений удельного расхода дутьевого воздуха $0,100 \div 0,125 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (режимы полной газификации), в котором обеспечивается мак-

симальная производительность реактора по горючему газу. Для интенсификации процесса полной газификации следует использовать мелкую фракцию угля (3–5 мм): это позволяет получить бóльшую удельную производительность реактора, а горючий газ в этом случае обладает большей удельной теплотой сгорания.

5. На основе процесса слоевой газификации угля с обращённым кислородным дутьём разработан новый способ преобразования бурого угля в синтез-газ. Принципиальное отличие нового способа от классической кислородной газификации заключается в том, что наряду с синтез-газом производится второй ценный продукт – средне-температурный кокс. Получаемый синтез-газ рекомендуется использовать после переработки в качестве сырья в процессах синтеза углеводородов, в том числе жидких топлив, а кокс – для производства формованного кокса металлургического назначения и бездымного бытового топлива.

6. Результаты экспериментальных исследований процесса слоевой газификации, полученные в настоящей работе, являются исходными данными для проектирования теплотехнологических установок, предназначенных для экологически безопасного производства газообразного энергоносителя (горючего газа), продуктов синтеза углеводородов, а также металлургического кокса и бездымного бытового топлива из бурого угля.

7. Методики обработки данных стендовых испытаний по слоевой газификации угля с обращённым воздушным, кислородным и обогащённым дутьём рекомендуются к применению при отработке технологических режимов для конкретных марок углей в проектах промышленных теплотехнологических установок на основе слоевой технологии «ТЕРМОКОКС».

Основные результаты и выводы

1. Выполнен критический анализ механизмов тепло- и массопереноса при слоевой газификации угля с обращённым дутьём, экспериментально определены температурная зависимость коэффициента температуропроводности и кинетика термического разложения бурого угля в диапазоне режимных условий, используемых в промышленных газификаторах.

2. Разработаны и внедрены универсальные методики обработки данных стендовых испытаний по слоевой газификации угля с обращённым воздушным, кислородным и обогащённым дутьём, используемые с целью получения исходных данных для проектирования промышленных теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС» (основных технологических показателей процесса, его материального и теплового балансов).

3. В широком диапазоне расходов дутьевого воздуха получены значения показателей теплотехнологического процесса переработки бурого угля при слоевой газификации с обращённым дутьём, таких как скорость процесса газификации, выхода газообразных и твёрдых продуктов процесса, их характеристик. Определены границы основных режимов работы газификатора на примере угля марки Б2 разреза «Бородинский» (Красноярский край): режима карбонизации (безотходного целевого производства среднетемпературного кокса и попутного производства газообразного энергоносителя), режима полной газификации (целевого производства газообразного энергоносителя) и области смешанных режимов, в которых работа газификатора нецелесообразна.

4. Определено влияние фракционного состава угля на показатели процесса газификации. Выявлено, что использование мелкой фракции (3–5 мм) при работе реактора на буром угле обеспечивает наибольшую производительность процесса как в режимах карбонизации, так и в режимах полной газификации.

5. Изучено влияние влажности бурого угля на показатели процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём. Выявлено, что предварительная сушка угля (снижение влажности примерно до 10%) и повышение расхода дутьевого воздуха в 3,8 раза в совокупности приводят к почти трёхкратному ускорению процесса карбонизации угля, а также к увеличению выхода кокса в 1,3 раза и повышению удельной теплоты сгорания продуктового газа на 20%.

6. Определено влияние расхода дутьевого кислорода на показатели процесса слоевой газификации бурого угля с обращённым дутьём. На основе полученных результатов разработан и защищён патентом РФ способ получения среднетемпературного кокса и синтез-газа в слоевом реакторе с обращённым кислородным дутьём, предназначенный для применения в составе промышленных комплексов по производству синтетических углеводородных топлив и продуктов на основе среднетемпературного кокса из бурого угля.

7. С учётом новых экспериментальных данных усовершенствована физическая модель процесса, разработана его математическая модель. Численно изучено влияние основных механизмов тепло- и массопереноса на интегральные показатели процесса при работе реактора в режимах карбонизации. Установлено, что использование в модели нелинейно зависящего от температуры эффективного коэффициента теплопроводности вместо постоянного значения этого параметра даёт более реалистичный (соответствующий экспериментально наблюдаемому) характер нагрева новых слоёв топлива при перемещении тепловой волны. Выявлено конкурирующее влияние кинетики термического разложения угля и эффективной теплопроводности на скорость перемещения тепловой волны. Показано, что подогрев дутьевого воздуха до 473 К приводит к увеличению скорости тепловой волны в 1,6 раза и увеличению выхода кокса примерно на 16% (отн.).

8. На основе полученных экспериментальных и расчётных данных разработаны практические рекомендации по совершенствованию комбинированного процесса переработки угля при слоевой газификации с обращённым дутьём.

9. Все практически значимые результаты диссертационной работы (методики обработки данных стендовых испытаний, практические рекомендации по совершенствованию процесса и др.) приняты компанией «Сибтермо» для использования при проектировании промышленных теплотехнологических установок на основе слоевых процессов «ТЕРМОКОКС».

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Михалев, И.О.** Экспериментальное исследование процесса слоевой газификации угля с обратной тепловой волной [Текст] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Актуальные проблемы энергетики: Материалы III Междунар. научн.-практ. конф. – Екатеринбург, 2007. – С. 106–109.

2. **Михалев, И.О.** Перспективные технологии использования угля [Текст] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Вестник Ассоциации выпускников Красноярского государственного технического университета. – 2008. – Вып. 16. – С. 126–129.

3. **Михалев, И.О.** О способах повышения экологической безопасности использования углеводородных топлив [Текст] / И.О. Михалев // Вестник Ассоциации выпускников Красноярского государственного технического университета. – 2008. – Вып. 17. – С. 148–152.
4. **Михалев, И.О.** Формальная кинетика выхода летучих веществ при термической деструкции частиц бурого угля [Текст] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Кокс и химия. – 2009. – № 2. – С. 9–11.
5. Пат. 2345116 РФ. МПК С10В 57/00, С10J 3.02 Способ получения кокса и синтез-газа при переработке угля [Текст] / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, **И.О. Михалев** (РФ). – № 2007131530; Заявлено 21.08.2007; Опубл. 27.01.2009, Бюл. 3.
6. **Михалев, И.О.** Влияние фракционного состава сырья и расхода дутья на процесс слоевой газификации угля с обратной тепловой волной [Текст] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Материалы XV Всерос. научн. конф. студентов-физиков и молодых учёных. – Кемерово–Томск, 2009. – С. 497–498.
7. **Михалев, И.О.** Экспериментальное исследование обращённого процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном и кислородном дутье [Электронный ресурс] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Материалы VI Всерос. межвуз. конф. молодых учёных. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 266–271.
8. **Михалев, И.О.** Экспериментальное исследование обращённого процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном и кислородном дутье [Текст] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – № 04 (62). – С. 75–81.
9. **Михалев, И.О.** Влияние влажности сырья на показатели процесса слоевой газификации угля с обращённым дутьём [Текст] / И.О. Михалев // VI Всерос. теплофизический семинар вузов по теплофизике и энергетике: Тез. докл. – Красноярск, 2009. – С. 73.
10. Исламов, С.Р. Энерготехнологическое использование угля на основе процесса слоевой газификации «ТЕРМОКОКС-С» [Текст] / С.Р. Исламов, **И.О. Михалев** // Промышленная энергетика. – 2009. – № 10. – С. 2–4.
11. **Михалев, И.О.** Экспериментальное исследование обращённого процесса слоевой газификации угля [Текст] / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 57–62.
12. Исламов, С.Р. Экологические аспекты современных технологий энерготехнологической переработки угля [Текст] / С.Р. Исламов, С.Г. Баякин, **И.О. Михалев** // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности. – 2009. – Т. 14, № 6. – С. 185–189.

Михалев Игорь Олегович
Совершенствование процесса переработки угля при слоевой газификации
с обращённым дутьём.

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук.

Подписано в печать 19.11.2009. Заказ № 869

Формат 60×90/20. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

ИПК ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»