

На правах рукописи



НАГОРНОВ Алексей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГАЗИФИКАЦИИ
МАЛОЗОЛЬНЫХ УГЛЕЙ В ПЛОТНОМ СЛОЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПРИ
ПАРОВОЗДУШНОМ ДУТЬЕ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2010

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете
имени И.И. Ползунова

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
Сеначин Павел Кондратьевич
- Научный консультант:** кандидат технических наук
Загрутдинов Равиль Шайхутдинович
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент
Пузырев Евгений Михайлович
кандидат технических наук, профессор
Фурсов Иван Дмитриевич
- Ведущая организация:** Уральский Федеральный
университет им. Б.Н.Ельцина
(УГТУ-УПИ), г. Екатеринбург

Защита состоится « 16 » апреля 2010 г. в 14.30 часов на заседании
Диссертационного совета Д 212.004.03 при Алтайском государственном
техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу:
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, АлтГТУ.
E-mail: D21200403@mail.ru, тел/факс (3852)260516.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АлтГТУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью Вашего
учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секре-
таря диссертационного совета.

Автореферат разослан « 15 » марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Е. Свистула

Подписано в печать 10.03.2010. Формат 60×84 1/16. Печать – цифровая.
Усл.п.л. 1,39. Тираж 120 экз. Заказ 127 / 2010.
Отпечатано в типографии АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.
Лицензия на полиграфическую деятельность № 28-35 от 15.07.97.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Общемировая тенденция к увеличению цен на углеводородные топлива подталкивает потребителей искать альтернативные более дешевые энергоносители. Газификация твердых топлив является одним из путей поддержания конкурентоспособности ряда производств. Многие технологические процессы требуют большого количества тепловой энергии, которую можно легко получить путем сжигания газа, полученного газификацией угля. Кроме того, генераторный газ может быть использован в газопоршневых электроагрегатах, что является актуальным для автономного энергообеспечения отдаленных производственных и гражданских объектов.

Интерес к технологиям переработки низкосортных твердых топлив (бурых и каменных углей), антрацитов, горючих сланцев, торфа, древесных отходов и т.д. на установках термохимической конверсии (газификации и пиролиза) в настоящее время возрастает в связи с неизбежным переходом мировой энергетики на малоуглеродные и неуглеродные технологии. Среди ведущих направлений предстоящей диверсификации энергетики будут технологии газификации твердых топлив.

В соответствии с этим **основной целью** работы является развитие существующих представлений о генерации горючих газов в плотном слое и разработка технологии их производства в газогенераторах Лурги, работающих под давлением на малозольном шубаркольском угле при паровоздушном дутье (ПВД), в том числе:

- определение возможности организации эффективного процесса газификации под давлением малозольного шубаркольского угля в газогенераторах Лурги при ПВД;
- определение оптимального газификационного соотношения «пар-воздух» (показателей газификации) в дутьевой смеси и диапазона надежной бесшлаковочной работы газогенераторов Лурги с ПВД при газификации шубаркольского угля (содержащего предельно низкое количество минеральной части - зольного остатка);
- разработка математической модели физико-химических процессов газификации углей в плотном слое газогенератора Лурги.

Для достижения этих целей решались **следующие задачи.**

- Анализ существующих методов газификации углей в плотном слое при ПВД, определение возможности газификации низкосольного шубаркольского угля в газогенераторах Лурги при ПВД и оптимизации соотношения объемов пара и воздуха в дутьевой смеси.
- Проведение систематических экспериментальных исследований на промышленных газогенераторах Лурги, работающих на низкосольном шубаркольском угле при ПВД и определение оптимальных значений показателей газификации.

- Сравнительный анализ режимов газификации угля при паровоздушном и парокислородном дутье (ПКД) и определение целесообразности работы Фабрики газификации угля на ПВД.

- Разработка математической модели физико-химических процессов газификации углей в плотном слое газогенератора Лурги на основе анализа существующих теоретических методов и новых экспериментальных данных.

Научная новизна (положения, выносимые на защиту).

- Оптимальные значения показателей газификации газогенераторов Лурги, работающих на низкочольном шубаркольском угле при ПВД.

- Результаты экспериментальных исследований работы газогенераторов Лурги при ПВД под давлением.

- Математическая модель физико-химических процессов газификации углей в плотном слое газогенератора Лурги.

Практическая значимость.

- Разработана конструкция газогенератора Лурги под давлением, способного работать на низкочольном угле.

- Проведен сравнительный анализ результатов исследований работы газогенераторов Лурги на ПКД и ПВД.

- Анализ технико-экономических показателей работы газогенераторов Лурги показал возможность реализации технологии газификации углей на ПВД с одновременным производством кокса.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется использованием достоверных результатов и современных мировых достижений в рассматриваемой области исследований, проведением модельных и широкомасштабных натурных экспериментальных исследований с применением современных экспериментальных методов.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались на конференциях различного уровня: II Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики. Энергоресурсосбережение» (Самара, 2004), конференции «Техпереворужение объектов энергетики на основе продуктов и услуг Уральского турбинного завода» (Екатеринбург, 2004), 3-й Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение, оптимизация энергопотребления и обеспечение экологической безопасности на предприятиях металлургической, горной и нефтехимической промышленности» (Санкт-Петербург, 2005), I Международной научно-технической конференции и Инвест-форуме Восточно-Казахстанской области «Энергетика, экология, энергосбережение» (Казахстан, Усть-Каменогорск, 2005), IV Международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири» (Красноярск, 2005), I и II Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики - ЭЭТПЭ-2007 и ЭЭТПЭ-2008» (Барнаул, 2007 и 2008), III

Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (Екатеринбург, 2007), Всероссийском семинаре кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике (Красноярск, 2009), 5th International Conference on «Technical and Physical Problems of Power Engineering» TPE-2009, (Bilbao, Spain, 2009), Международной научно-технической конференции «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля» (Москва, ВТИ, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованном ВАК, 6 тезисов и 9 докладов на конференциях различного уровня, учебное пособие и монография.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 144 страницы, 29 рисунков, 12 таблиц и 130 цитированных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны ее научное и практическое значения, изложены основные положения, выносимые на защиту.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ОПЫТА ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ В ПЛОТНОМ СЛОЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ С ПАРОВОЗДУШНЫМ ДУТЬЁМ

В середине прошлого века в СССР был выполнен огромный комплекс исследований процессов газификации твёрдых топлив под давлением.

- В лабораторных условиях проводились исследования термодинамических характеристик процессов газификации под давлением до 30 МПа, которые, в основном, выполнялись в ИГИ (г. Москва) и других НИИ.

- На основе теоретических исследований и эмпирических зависимостей, полученных в лабораторных условиях и на опытно-промышленных установках, были разработаны методики теплового расчёта газогенераторов.

- В лабораторных условиях, на опытно-промышленных и промышленных установках исследовались характеристики процессов газификации различных видов твёрдого топлива (торфа, бурых и некоторых марок каменных углей) под давлением на ПКД и ПВД.

Рассмотрено состояние технологий газификации углей в плотном слое под давлением при ПВД и влияние основных характеристик топлива и физико-химических процессов в реакторе газификатора на технологические и экономические показатели работы газогенератора Лурги.

Рассмотрена классификация, основные свойства и характеристики углей как сырья для получения генераторных газов. Показано, что процесс газификации под давлением может быть организован не только на ПКД, но и на ПВД и других видах дутья, при этом пригодность конкретного топлива (в том числе с предельно низким содержанием минеральной части) для газификации с ПВД может быть окончательно установлена только в результате испытания на промышленных установках газификации.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ЛУРГИ ПРИ ПАРОВОЗДУШНОЙ ДУТЬЕ

В газогенераторах Лурги, работающих под давлением, на АО «Алюминий Казахстана» газифицировался Шубаркольский длиннопламенный каменный уголь марки Д (таблица 1). Особенностью выбора топлива для газификации являлась необходимость применения низкосольного угля, используемого в технологии завода при обжиге гидрооксида алюминия.

В мировой практике эксплуатации газогенераторов Лурги газификация угля с зольностью $A^d=3,5-3,7\%$ не имела место (ранее газифицировались угли с зольностью не менее $A^d=10-12\%$). Это связано с тем, что низкая зольность топлива ограничивает возможность его газификации в плотном слое.

Таблица 1 - Характеристики газифицируемого угля

Состав угля (на рабочую массу):	Значение
Влажность (W^f), %	11,41
Зольность (A^f), %	3,17
Содержание горючих веществ ($100-W-A$) ^f , %	85,42
Горючие вещества:	
Летучие вещества (V) ^{dat} , %	46,96
Нелетучие вещества (NV_0) ^{dat} , %	53,04
Состав горючих веществ:	
C^{dat} , %	77,81
H^{dat} , %	5,4
O^{dat}	14,86
N^{dat} , %	1,59
S_{org}^{dat} , %	0,34
Температурные характеристики золы (в полувосстановительной среде):	
Температура начала спекания T_s , К	1095-1100
Температура начала размягчения T_A , К	1465-1475
Температура начала плавления T_B , К	1560-1680
Температура жидкого состояния T_C , К	1630-1770
Высшая теплотворная способность (Q_s) (HHV)	26,9 МДж/кг (6435 ккал/кг)
Низшая теплотворная способность (Q_i) (LHV)	25,61 МДж/кг (6127 ккал/кг)
Индекс (показатель) свободного набухания FSI	0,5
Размер зерна (крупность) угля	5+30 мм
Частицы с размерами < 10 мм	Максимум 3 % по весу

Схема газогенератора Лурги для газификации Шубаркольского каменного длиннопламенного угля крупностью 5-30 мм в стационарном слое под давлением и схема экспериментального контроля с точками замера основных анализируемых параметров работы на ПВД приведена на рисунке 1. Погрешность измерения температуры сред термосопротивлениями и термопреобразователями составляла $\pm 0,3-0,5\%$, а в зонах реактора - $0,75\%$, давления - $\pm 0,25\%$, расхода газовых сред и концентраций $\pm 1,0\%$.

Для работы на ПВД в конструкцию газогенератора были внесены изменения: 1) реконструирован смеситель системы подачи ПВД с подачей воздуха

по двум каналам - пусковом воздушном и кислородном; 2) смонтированы и испытаны две схемы наддува и сброса давления угольного и зольного шлюзов – перегретым паром и генераторным газом (была принята схема наддува генераторным газом); 3) демонтирована система механической очистки газо-выпускного отверстия от отложений; 4) изменена схема выпуска золовых остатков из золowego шлюза (заменена схемой обезвоживания шлака).

Газогенератор работал при давлении воздуха и пара перед смесителем равном 1,4 МПа, а газификация угля производилась под давлением 1,2-1,3 МПа. В таблице 2. представлена схема непрерывного прямого процесса газификации (движение топлива и газов – противоточное) в плотном слое с твёрдым золоудалением, а в таблице 3 приведены параметры дутьевой смеси.

Таблица 2 - Характеристика процессов газификации в плотном слое

Зоны в газогенераторе	Процессы, реакции	Выделяемые и транспортируемые компоненты
Надслойное пространство		Генераторный газ, унос угольной пыли, водяные пары, смолы
Зона сушки и нагрева (выделения летучих веществ)	Сушка топлива и сухая перегонка угля	Водяные пары и смолы, H_2S , CH_4 , C_mH_n , CO_2 , CO , H_2 , H_2O
Вторая восстановительная зона (низкотемпературной карбонизации)	$C + CO_2 = 2CO$ $C + 2H_2 = CH_4$ $CO + H_2O = CO_2 + H_2$	CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , H_2O
Первая восстановительная зона (высокотемпературной карбонизации)	$C + CO_2 = 2CO$ $C + H_2O = CO + H_2$ $CO + H_2O = CO_2 + H_2$	CO_2 , CO , H_2 , H_2O
Окислительная реакционная зона (кислородная)	$C + O_2 = CO_2$ $C + CO_2 = 2CO$ $2CO + O_2 = 2CO_2$	O_2 , CO_2 , CO , H_2O
Зольная подушка		Зола, шлак, кокс

Таблица 3 - Параметры паровоздушной дутьевой смеси

1	Общее количество дутьевого пара на газогенератор, т/ч	1,7
3	Количество внешнего дутьевого пара в смеси, т/ч	0,4
2	Количество воздуха в дутье газогенератора, м ³ /ч	3600
3	Количество кислорода в дутье, м ³ /ч	756
4	Давление дутьевой смеси, МПа	1,0-1,1
5	Температура внешнего пара в дутье, К	550-570
6	Давление внешнего пара в дутье (регулируемое), МПа	1,56

Зависимости, используемые при анализе работы газогенераторов Лурги при ПВД. В соответствии поставленными с целями исследования режимов работы газогенераторов Лурги на ПВД в экспериментах проверялись:

- соотношения входных параметров (состав и концентрация газифицирующей смеси – показатели газификации) и выходных (содержания отдельных компонентов неочищенного газа, теплотворной способности, удельной теплоты сгорания);

- зависимости выходных параметров (содержания отдельных компонентов неочищенного газа, теплотворной способности, удельной теплоты сгорания) от температуры дутьевой смеси;
- зависимости температур слоёв угля в зонах сушки топлива T_1 (температур слоя угля в зоне сушки) и в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 от коэффициента газификации и температуры дутьевой смеси;
- соотношения выходных параметров генераторного газа (содержания отдельных компонентов неочищенного газа, теплотворной способности, удельной теплоты сгорания) и температур слоёв угля в зонах сушки и начала пиролиза топлива T_1 (температур слоя угля под ретортой) и в зоне низкотемпературной карбонизации (полукоксования) T_2 .

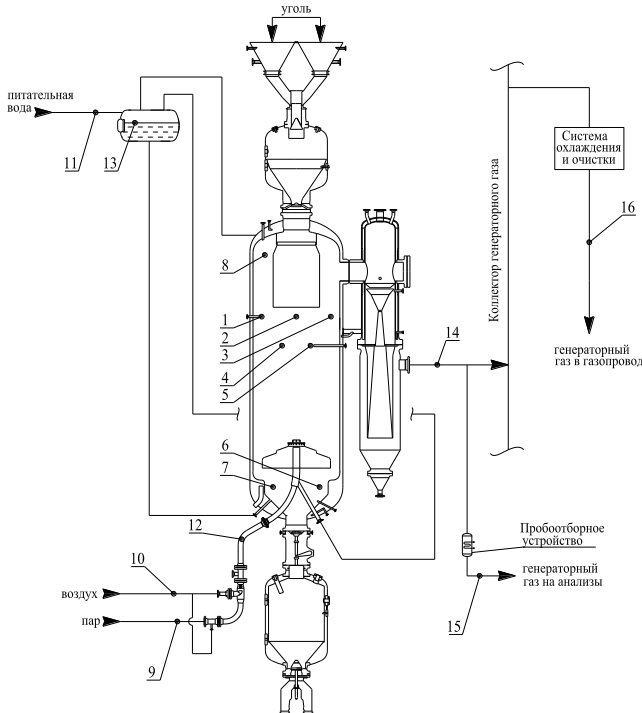


Рисунок 1 –
Схема газогенератора Лурги
и расположение
точек измерения
контролируемых сред
при ПВД

Определяющими факторами процесса, оказывающими максимальное влияние на режим работы газогенераторов, являются газификационные соотношения K_1 и K_2 (коэффициенты или показатели газификации):

- K_1 – отношение количества внешнего перегретого дутьевого пара (кг/час) к количеству содержащегося технического (95%-го) кислорода в дутьевом воздухе при нормальных условиях ($\text{нм}^3/\text{час}$)

$$K_1 = Q_1 / F_{O_2}, [\text{кг } H_2O / \text{нм}^3 O_2];$$

• K_2 – отношение суммарного (внешнего перегретого и внутреннего насыщенного) дутьевого пара (кг/час) к количеству кислорода в дутье
 $K_2 = Q_2/F_{O_2} = (Q_1 + Q_3)/F_{O_2}$, [кг $H_2O/нм^3 O_2$].

В работе *при ПВД рассматриваются следующие зависимости:*

- зависимость между коэффициентами K_2 и K_1 ;
- изменение состава и теплотворной способности генераторного газа от коэффициентов газификации;
- влияние на состав и теплотворную способность генераторного газа температуры дутьевой смеси;
- влияние режима работы газогенератора на температуру верхних слоёв газифицируемого топлива.

3 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ЛУРГИ НА ПАРОВОЗДУШНОМ И ПАРОКИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ

Изменение состава генераторного газа и его теплотворной способности от коэффициентов газификации. На рисунке 2 представлены зависимости объёмных концентраций составляющих парокислородного и паровоздушного генераторных газов (%) от коэффициента газификации K_1 .

Из зависимостей для ПКД и ПВД видно, что характеры изменения компонентов газов от величины газификационного отношения отличаются. При ПКД с увеличением коэффициента K_1 повышается содержания диоксида углерода и метана за счёт снижения образования монооксида углерода, что вполне соответствует рассмотренным в работе физико-химическим процессам, протекающим в восстановительных зонах газогенератора Лурги.

На рисунке 3 представлены зависимости теплотворной способности парокислородного и паровоздушного генераторных газов (МДж/нм³) от коэффициента газификации K_1 .

При ПВД в диапазоне $K_1=0,22-1,50$ характеры зависимостей изменения концентрации компонентов и калорийности газа не столь однозначны, как те же зависимости при ПКД - до $K_1=0,7$ количество CO и, соответственно, теплотворная способность газа значительно повышаются, а затем начинают снижаться. Но, этот изгиб настолько незначителен, что характер зависимости можно считать линейным. Отметим, что здесь и в предыдущих разделах, теплотворная способность газа приведена без учёта тяжёлых углеводородов C_nH_m , а только по трём горючим компонентам (CO , H_2 и CH_4).

Изменение температур в зоне сушки и нагрева T_1 и в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 от коэффициента газификации K_1 . Как можно видеть из зависимостей температур верхних слоёв угля в реакторе T_1 и T_2 от коэффициента газификации для ПКД и ПВД (рисунок 4), их характер примерно одинаков. Видно, что при ПВД средний температурный уровень в зоне низкотемпературной карбонизации выше, чем при работе газогенератора Лурги на ПКД, хотя в зоне сушки и нагрева топлива значения температур газа примерно одинаковы.

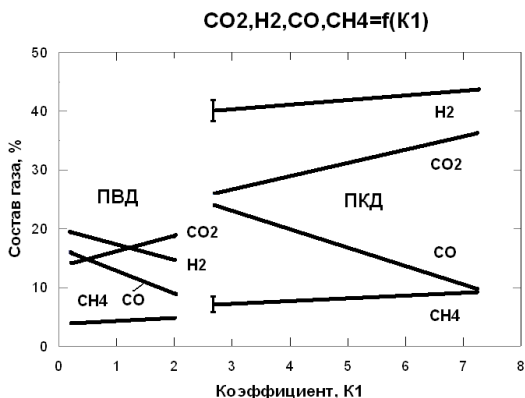


Рисунок 2 – Зависимости объёмных концентраций составляющих паровоздушного и парокислородного генераторных газов (%) от коэффициента газификации K_1

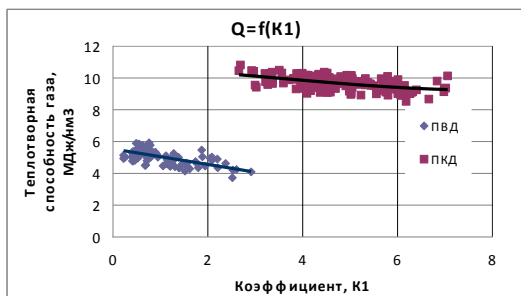


Рисунок 3 – Зависимости теплотворной способности паровоздушного и парокислородного генераторных газов Q от коэффициента газификации K_1

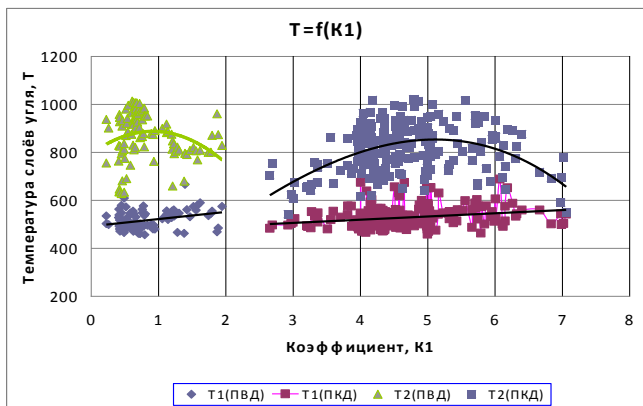


Рисунок 4 – Зависимости температур в зоне прогрева и сушки T_1 и в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 от коэффициента газификации K_1

На рисунке 4 заметен сильный разброс точек, отражающих отдельные режимы работы газогенератора. Это объясняется тем, что зависимости построены по результатам обработки многочисленных испытаний, выполненных на разных газогенераторах в течение трёх с лишним месяцев. При этом в

анализе невозможно было учесть изменение различных параметров и факторов, важнейшими из них являлись качество загружаемого в газогенераторы топлива – изменение влажности, фракционный состав и пр. Не были стабильными и характеристики дутья (температуры внешнего пара и воздуха и их соотношения). Как известно, границы зон в реакторе не являются постоянными, а зависят от множества параметров, в том числе перечисленных выше.

Из рисунка 4 видно, что как при ПКД, так и при ПВД зависимости температур газа в зоне низкотемпературной карбонизации имеют параболический характер со своими максимумами температур. Причём максимумы температур в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 отражают оптимальные процессы в зонах реактора, расположенных ниже, с точки зрения технологического режима и качества генерируемого газа. Вид зависимостей температур в зоне сушки сильно зависит от качества угля (особенно его влажности) и частоты загрузки (рабочей мощности газогенератора), а также от характера процессов, происходящих в активной зоне и зонах восстановления.

Изменение соотношения между коэффициентами газификации K_1 и K_2 . На рисунке 5 представлены зависимости коэффициента газификации K_2 от коэффициента K_1 для двух типов дутья – ПВД и ПКД. Видно, что если зависимости при ПВД и ПКД рассматривать совместно, то они могут быть описаны линейной функцией, которая с незначительными погрешностями может быть обобщена линейной функцией $K_2=1,9+1,0 \cdot K_1$.

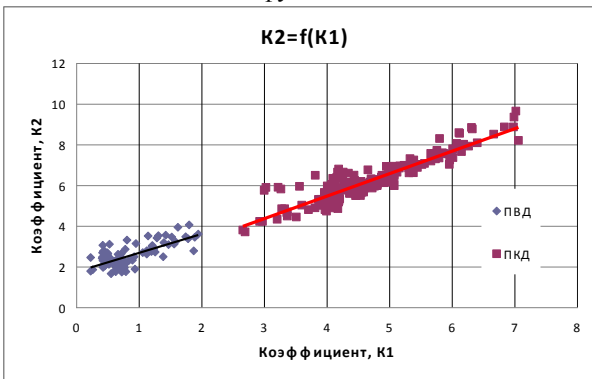


Рисунок 5 –
Зависимость
между коэффициентами газификации K_2 и K_1

Как и все другие сравниваемые функции от K_1 , эти зависимости располагаются в разных не пересекающихся областях диапазона изменения K_1 . Разность K_2-K_1 по сути дела является характеристикой тепловыделения в реакторе и показывает степень парообразования в его контуре охлаждения. Тогда становится очевидным, что в режиме ПКД с повышением коэффициента газификации тепловыделение в реакторе увеличивается при одновременном снижении CO и снижении качества газа. То есть, увеличение пара в дутье приводит к ухудшению условий для эндотермических реакций, что согласуется с теорией. В режиме ПВД, при относительно низком температурном

уровне в реакторе, увеличение пара в дутье с K_1 равного 0,22 до 1,00 не приводит к заметному увеличению теплосъёма. При дальнейшем увеличении K_1 коэффициент K_2 также увеличивается.

Изменение состава генераторного газа и его теплотворной способности от температуры дутьевой смеси. На рисунке 6 представлены зависимости объёмных концентраций составляющих паровоздушного и парокислородного генераторных газов (в %) от температуры дутьевой смеси.

Низкая область температур дутьевой смеси при ПВД объясняется тем, что, воздух перед смешением с паром предварительно не подогревался. Увеличение концентрации относительно «холодного» пара в дутье снижает температуры горения в активной зоне, а в восстановительных зонах ухудшаются условия для эндотермических реакций, что характеризуется снижением концентрации CO и теплотворной способности газа (рисунок 7).

Изменение температур в зоне сушки T_1 и в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 от температуры дутьевой смеси. Эти зависимости для режимов ПВД и ПКД приведены на рисунке 8.

Обращает на себя внимание схожий характер изменения зависимостей температур в зоне сушки топлива и его нагрева при обоих видах дутья – ПВД и ПКД. Все значения температур располагаются в интервале 450-650 К при средних значениях 500-550 К.

При работе газогенератора на ПВД зависимость температура в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 заметно повышается с увеличением пара в дутье (соответственно с повышением температуры дутьевой смеси). Концентрация CO в газе уменьшается, теплотворная способность газа снижается, а температура в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 повышается

Технико-экономические показатели газогенераторов Лурги, работающих под давлением, при ПВД и ПКД, представлены в таблице 4.

Низкая температура дутьевой смеси является следствием наличия в нём большого (до 3600 $\text{нм}^3/\text{ч}$) количества относительно холодного (около 310-340 К) воздуха. При дополнительном подогреве воздуха хотя бы до 520-570 К экономичность работы газогенератора могла бы резко повыситься. При этом процесс мог бы проводиться с более высоким содержанием водяного пара в дутье и увеличением образованием водорода в газе.

Таким образом, КПД газификации при ПКД ($\eta_{\text{газиф}}=72,1\%$) выше, чем при ПВД (с использованием кокса) примерно на 6 %. Однако, КПД газогенератора при ПКД ($\eta_{\text{гг}}=64,7\%$) ниже, чем при ПВД (с использованием кокса) примерно 1,5 %. Следует отметить, что в расчёте КПД не учитывалась удельная теплота сгорания смол, выделяемых из газа, также большей частью сжигаемых вместе с газом в печах обжига гидрооксида алюминия.

Сравнение себестоимости производства генераторного газа при ПВД и ПКД. Выбор вида дутья определяется из экономических соображений. Что дешевле – иметь качественный газ и полностью сжигать его в печах обжига, замещая мазут, или при некачественном газе, дополнительно сжигать

кокс, получаемый на Фабрики газификации угля? Для облегчения выбора в таблице 5 приведен расчёт себестоимости генераторного газа при ПВД и ПКД (цены приняты по рынку Казахстана).

$$\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{CO}, \text{CH}_4 = f(T_{\text{см}})$$

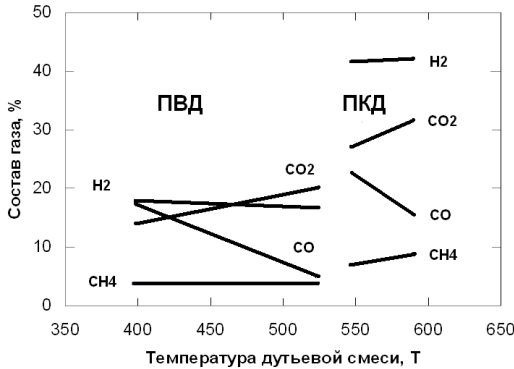


Рисунок 6 – Зависимости объёмных концентраций составляющих паровоздушного и парокислородного генераторного газа (%) от температуры дутьевой смеси (K)

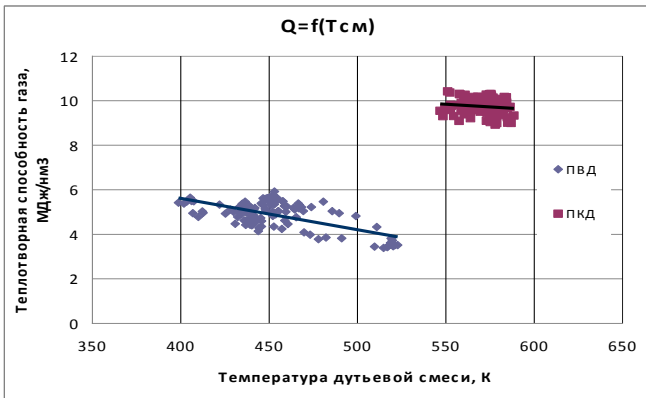


Рисунок 7 – Зависимости теплотворной способности паровоздушного и парокислородного генераторного газа (МДж/нм³) от температуры дутьевой смеси $T_{\text{см}}$ (K)

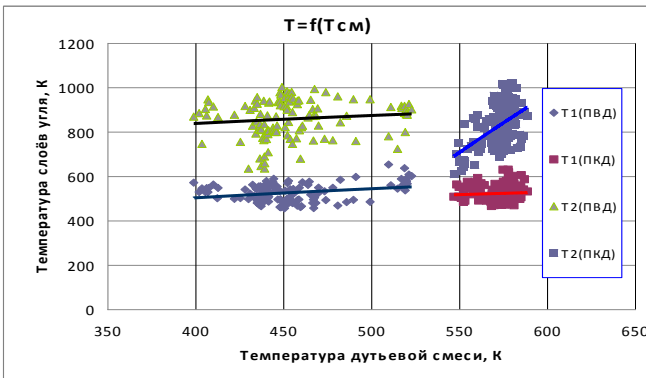


Рисунок 8 – Зависимости температур в зоне прогрева и сушки T_1 и в зоне низкотемпературной карбонизации T_2 от температуры дутьевой смеси

Таблица 4 – Характеристики работы при ПВД и ПКД

№ п/п	Наименование параметра	Обозн.	Ед. изм.	Значение ПКД	Значение ПВД
1	Расход газа	V	нм ³ /ч	9250	6550
2	Расход угля	R	кг/ч	5200	3440
3	Расход пара в дутье	D	(кг/ч)	4900	400
4	Расход кислорода в дутье	V_{O_2}	(нм ³ /ч)	1320	750
5	Температура пара	T_p	К	600	560
6	Состав газа, %:	-	-	-	-
	H_2	-	%	41,1	18,34
	CO	-	%	23,0	14,92
	CO_2	-	%	28,3	16,00
	CH_4	-	%	7,5	3,92
	O_2	-	%	0,1	0,67
7	Теплотворность газа без учёта C_nH_m	Q_r	МДж/нм ³ (ккал/нм ³)	10,05 (2400)	5,27 (1260)
8	Теплотворность газа с учётом C_nH_m	Q_r	МДж/нм ³ (ккал/нм ³)	10,38 (2480)	5,90 (1410)
9	Содержание горючих в золе (в виде коксовых частиц), для ПКД	r^k	%	5	
10	Количество кокса в удаляемой золе	B_k	кг/ч	-	675
11	КПД без использования кокса: - газификации - газогенератора (низший)	$\eta_{газиф}$ $\eta_{гг}$	% %	72,1 64,7	45,2 42,6
12	КПД с учётом кокса: - газификации - газогенератора (низший)	$\eta_{газиф}$ $\eta_{гг}$	% %	- -	66,4 66,1

Себестоимость генераторного газа ПВД в таблице приведена без учёта стоимости получаемого кокса и – с учетом стоимости кокса (при выработке 1000 нм³ паровоздушного газа получается 103 кг кокса). В этом случае себестоимость 1 т.у.т. газа ПВД будет стоить 51,16 долларов США, то есть ниже себестоимости генераторного парокислородного газа.

Таблица 5 – Расчет себестоимости генераторного газа при ПВД и ПКД
(на 1000 нм³ сухого генераторного газа)

№№ п/п	Наименование показателя	ПВД	ПКД [85]
1	Топливная составляющая: - количество угля, кг - стоимость угля, \$ США	525 8,77	562 9,39
2	Стоимость электроэнергии на компримирование и прочее оборудование, \$ США	6,36	4,51
3	Стоимость внешнего пара и химочищенной воды, \$ США	0,58	5,06
4	Доля фонда заработной платы в газе, \$ США	2,27	1,61
5	Себестоимость 1 т.у.т. (1000 нм ³ газа теплотворной способностью 7000 ккал/нм ³), \$ США	89,26	58,06
6	Себестоимость 1 т.у.т. (с учётом использования кокса стоимостью 100 \$ за тонну), \$ США	51,16	58,06

4 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ В ПЛОТНОМ СЛОЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ЛУРГИ

Реакции взаимодействия топлива с кислородом дутьевой смеси являются первичными и, как правило, протекают в окислительной (кислородной) зоне (рисунок 1, таблица 2). Кинетика взаимодействия диспергированного угля с кислородом довольно сложна. Многие аспекты этого взаимодействия до настоящего времени остаются предметом дискуссионного обсуждения - проблеме посвящено большое число отечественных и зарубежных работ. В настоящее время, в основном, рассматриваются макрокинетические модели взаимодействия кислорода с углеродом кокса. Основные химические реакции – макрокинетики процесса газификации твердого топлива, учитываемые в данной работе, приведены в таблице 2. При описании макрокинетики химических процессов в газогенераторе Лурги, кроме кислородной зоны мы выделяем еще одну реакционную зону – зону карбонизации (объединяя высокотемпературную и низкотемпературную зоны).

Физическая модель пористой среды. В работе принята следующую физическая модель насыщенной гетерогенной пористой среды.

1. Среда состоит из плотно упакованных твердых частиц, пространство между которыми заполнено смесью идеальных газов при невысоких давлениях ($p \approx 1$ МПа), с плотностью значительно меньшей плотности скелета.

2. В составе газовой смеси и твердых фаз присутствуют как инертные, так и химически активные вещества, взаимодействующие между собой с выделением (поглощением) тепловой энергии и образованием конденсированных и газообразных продуктов. Предполагается, что частицы скелета состоят из твердого реагента и инертного балласта, а газовая смесь в порах – из окислителя, инертного газа и продуктов реакций.

3. Температура плавления твердых фаз весьма высока и изменения агрегатного состояния не происходят (кроме учитываемых химических реакций).

4. При горении скелет пористой среды не деформируется, обладает постоянной пористостью, покоится или движется с одинаковой для всей среды скоростью \vec{u}^* относительно стенок, ограничивающих вертикальный реактор.

5. Фильтрационное движение газа в порах (относительно скелета) вследствие компактной упаковки частиц происходит с достаточно малой скоростью \vec{w}_f .

6. Работа сил давления и тяжести, изменение кинетической энергии и импульса при фильтрации газа несущественны и не учитываются.

Рассмотрены *основные гипотезы феноменологического метода* описания усредненных характеристик пористой среды, включающей количественное описание *процессов переноса энергии, импульса и массы* в гетерогенных пористых средах, структура и характеристики которых носят неупорядоченный, статистический характер. Анализ основан на феноменологическом ме-

тоде описания «усредненных характеристик среды», предложенном Р.И. Нигматулиным, и решении задачи о скорости распространения волны горения в пористой среде при внешнем подводе газообразного окислителя А.П. Алдушиным, А.Г. Мержановым и Б.И. Хайкиным, положенным в основу балансного метода анализа непрерывного слоевого процесса Г.С. Суховым и Л.П. Яриным.

Математическая модель физико-химических процессов в различных зонах реактора газогенератора Лурги. Примем для обозначения фаз рассматриваемой гетерогенной системы общий индекс «*i*» и частные индексы «*g*»- газ (gas), «*h*»- твердый (hard) реагент, «*b*»- балласт (ballast), а для обозначения компонентов газовой фазы – общий индекс «*s*», в том числе «1»- кислород O_2 , «2»- азот N_2 , «3»- водяной пар H_2O , «4»- двуокись углерода CO_2 , «5»- окись (монооксид) углерода CO , «6»- водород H_2 , «7»- метан CH_4 .

Пусть имеется прямоточный реактор цилиндрической формы радиусом r (рисунок 9), работающий под давлением p , в котором протекает процесс горения и газификации угольного слоя достаточно большой толщины. Твердая фаза (уголь фракции 5,0-30,0 мм) подается сверху со скоростью \vec{u}^* относительно стенок реактора газификатора. Движение твердой фазы происходит под действием гравитационной силы. Эта твердая фаза (кокс угля) в стационарном режиме работы газогенератора поступает во фронт пламени со скоростью горения \vec{w}_f . ПКД или ПВД первичный и вторичный пар и 95 % технический кислород или воздух поступают снизу через колосниковую решетку и зольную подушку VII (рисунок 9) с относительной скоростью фильтрации \vec{w}_ϕ . При этом пространственная (видимая) скорость фронта пламени \vec{u}_f и скорость движения газовой фазы \vec{u} относительно стенок записуются:

$$u_f = w_\phi - u^*, \quad u = w_\phi - u^*.$$

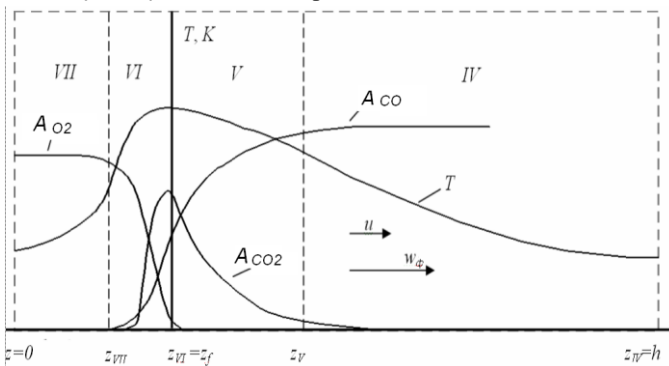


Рисунок 9 – Структура волны горения и профили концентраций компонентов газовой фазы и температуры слоя по высоте реактора газификатора Лурги ($z=z_{VI}$ - координата фронта пламени; h - высота активной части реактора, приведенной на рисунке)

Математическая модель рассматриваемых зон включает:

- уравнения тепломассопереноса с химическими реакциями

$$\frac{d}{dz} \sum_s \rho_s (w_\phi - u^*) = \sum_s \left(M_s \sum_j W_j \right), \quad \rho_C u^* \frac{d\eta}{dz} = M_C \sum_j W_{Cj},$$

$$\left[(w_\phi - u^*) \sum_s c_s \rho_s - u^* (c_C \rho_C + c_b \rho_b) \right] \frac{dT}{dz} = \sum_j W_j q_j + \lambda \frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{\alpha}{r} (T - T_0),$$

- уравнения закона Дарси, состояния и концентрации компонентов газовой фазы и стехиометрическое соотношение

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{w_\phi}{k_\phi}, \quad \varepsilon p = \varepsilon \sum_s p_s = RT \sum_s \frac{\rho_s}{M_s},$$

$$A_s = \rho_s / (\varepsilon M_s), \quad \rho_C = \rho_C^* (1 - \eta),$$

- макрокинетический закон горения кокса по реакциям газификации и уравнения скоростей газофазных реакций

$$W_j = K_{Cj} S_C (1 - \eta), \quad K_{Cj} = \beta_j A_j / (k_{Wj} + d_0 / \text{Nu}_D D_j),$$

$$W_{sj} = k_{sj} \prod A_{sj}^{n_j} \exp(-E_{sj} / RT), \quad \text{Nu}_D = 2 + 2,22 \text{Pe}_D^{2/3}$$

и другие соотношения.

Граничные условия учитывают, что рассматривается проточный реактор с охлаждаемым входом и секцией с отводящим генерируемый газ устройством, нарушающим сплошность движения твердофазных компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Анализ существующих методов газификации углей в плотном слое под давлением показал, что промышленная эксплуатация газификаторов плотного слоя под давлением (в том числе газификаторов Лурги) при паровоздушном дутье (ПВД) ранее не имела места. Эксплуатация газогенераторов на угле с зольностью не превышающей $A_d^d = 3,5-3,7\%$ также ранее не имела места (обычное значение зольности 10-15%).

2. Проведены систематические экспериментальные исследования на промышленных газогенераторах Лурги и доказана принципиальная возможность газифицирования шубаркольского низкозольного ($A_d = 3,17\%$) длинно-пламенного каменного угля марки Д в плотном слое под давлением с ПВД. Показано, что процесс газификации проходит с низкими энергетическими характеристиками даже при полезно используемом коксе в золовых остатках - КПД газификации без использования кокса 45,2 %, а с использованием кокса - 66,4 %, что ниже чем при ПКД - 72,1 %. При этом КПД газогенератора без использования кокса 42,6 %, а с использованием кокса - 66,1 %, что превышает соответствующий показатель при работе с ПКД, равный 64,7 %.

3. Обобщены экспериментальные данные по режимам работы промышленных газогенераторов Лурги на ПВД, в том числе получены:

- экспериментальные зависимости выходных параметров газа (объемной концентрации составляющих генераторного газа и его калорийности Q (МДж/нм^3) от коэффициента газификации K_1 (в диапазоне 0,2-1,5);
- экспериментальные зависимости температур газа в слоях реактора (T_1) и (T_2) от коэффициента газификации K_1 в указанном диапазоне его изменения;
- оптимальные значения коэффициентов газификации K_1 (диапазон – 0,4-0,6) и K_2 (диапазон – 2,3-2,5);
- диапазон безшлаковой работы газогенераторов Лурги при ПВД при значениях K_1 от 0,4 до 0,7.

4. Сравнительный анализ результатов исследований работы газогенераторов Лурги на паровоздушном и парокислородном дутье показал экономическую целесообразность работы Фабрики газификации АО «Алюминий Казахстана» (г. Павлодар) на паровоздушном дутье при условии использования дополнительно получаемого кокса в золовых остатках.

- Минимальную себестоимость 1 тонны условного топлива (т.у.т.), то есть 1000 нм³ газа теплотворной способностью 29,3 МДж/нм³ (7000 ккал/нм³) имеет газ ПКД и составляет 58,1 долларов США. Себестоимость 1 т.у.т. газа ПВД, существенно выше и составляет 89,3 долларов США.

- Себестоимость 1 т.у.т. газа ПВД, при условии использования дополнительно получаемого кокса, составляет 51,2 долларов США, что ниже себестоимости газа при ПКД. Это экономически оправдывает эксплуатацию Фабрики газификации с использованием ПВД.

5. Проведен анализ классических работ по математическому моделированию процессов горения и газификации углей в плотном слое и разработаны математические модели для численного моделирования физико-химических процессов в окислительной и числановительных зонах реактора газификатора Лурги под давлением при работе на ПВД и ПКД.

На основе феноменологического метода описания «усредненных характеристик» пористой среды Р.И. Низматулина, решения А.П. Алдушиным, А.Г. Мержановым и Б.И. Хайкиным задачи о скорости распространения волны горения в пористой среде при внешнем подводе газообразного окислителя и балансного метода анализа непрерывного слоевого процесса, предложенного Г.С. Суховым и Л.П. Яриным, реализованы и решены следующие задачи:

- Введены основные характеристики и сформулирована физическая модель насыщенной пористой среды как объекта газификации углей в плотном слое газогенератора Лурги.

- Рассмотрена макрокинетика процессов горения и газификации углей в плотном слое в различных зонах газогенератора Лурги.

- Сформулирована физико-математическая модель процессов переноса и записаны уравнения баланса массы вещества, импульса и энергии в реагирующей насыщенной пористой среде.

- Построена математическая модель физико-химических процессов в различных зонах реактора газогенератора Лурги.

Результаты исследования были использованы при проведении пусконаладочных работ на оборудовании первой очереди Фабрики газификации угля АО «Алюминий Казахстана» (г. Павлодар), составлении рекомендаций по режимам эксплуатации газогенераторов Лурги под давлением с паровоздушным дутьем и при проектировании оборудования второй очереди Фабрики.

Основные результаты опубликованы в работах:

статьи в изданиях, рекомендованных ВАК -

1. Загруднинов, Р.Ш. Наладочные испытания газогенераторов Лурги и перспективы газогенераторных технологий / Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, П.К. Сеначин // *Ж. Ползуновский вестник*, 2007.- №3. – С. 40-47.

2. Загруднинов, Р.Ш. Показатели работы газогенераторов плотного слоя Лурги при парокислородном и паровоздушном дутье / Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, П.К. Сеначин, С.Н. Шитова // *Ж. Ползуновский вестник*, 2008.- № 4. – С. 28-33.

другие работы, отражающие основное содержание диссертации -

3. Zagrutdinov, R.Sh. Petrerformance of Lurgi Type Gas Producers of Dense Bed Operating with Oxygen-Steam and Aero-Steam Blast / R.Sh. Zagrutdinov, **A.N. Nagornov**, P.K. Senachin, S.N. Shitova // 5th International Conference on «Technical and Physical Problems of Power Engineering». TPE-2009 / University of Basque Country, 3-5 September 2009.- Bilbao, Spain.- P. 324-327.

4. Загруднинов, Р.Ш. Результаты промышленных испытаний по газификации длиннопламенного каменного угля в слоевом газификаторе / Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, Н.А. Нагорнов, И.С. Белоусов, А.Т. Ибрагимов, Н.П. Деревянкин // Актуальные проблемы энергетики. Энергосбережение: Труды II Всероссийской научно-практической конференции / Самара, 18-20 мая 2004 г. – Самара: Самарский областной Дом науки и техники, 2004. – С. 35-39.

5. Загруднинов, Р.Ш. Создание компактных небольших энергетических предприятий по выработке тепла и электроэнергии на базе местных месторождений торфа, горючих сланцев, бурого и каменного угля / Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, Н.А. Нагорнов, Д.Г. Малыхин // Сборник докладов конференции «Техпереворужение объектов энергетики на основе продуктов и услуг Уральского турбинного завода» / Екатеринбург, 17 ноября 2004.– Екатеринбург: ЗАО «Уральский турбинный завод», 2004.– С. 88-92.

6. Ибрагимов, А.Т. Перспективы газогенераторных технологий и их внедрение в промышленной энергетике/ А.Т. Ибрагимов, Н.П. Деревянкин, Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, Н.А. Нагорнов // Достижения и перспективы развития энергетики Сибири: Материалы IV Международной научно-технической конференции / Красноярск, 20-21 октября 2005 г. – Красноярск: Изд-во Краснояр. филиала ОАО «Сибирский ЭНТЦ», 2005. – С. 455-463.

7. Загруднинов, Р.Ш. Наладка и опытная эксплуатация газогенераторов Лурги на парокислородном дутье и перспективы газогенераторных технологий / Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, П.К. Сеначин // Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (ЭЭТПЭ-2007): Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, 17-20 октября 2007. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2007. – С. 124-128.

8. Загруднинов, Р.Ш. Перспективы газогенераторных технологий и их внедрение в промышленной энергетике / Р.Ш. Загруднинов, **А.Н. Нагорнов**, Д.Г. Малыхин, П.Э. Капуста // Матер. III Междунар. научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики» / Екатеринбург, 21-23 ноября 2007.– Екатеринбург: Изд-во: «ИРА УТК», 2007. – С. 83-87.

9. Малыхин, Д.Г. Практический опыт эксплуатации газогенераторов Лурги на фабрике газификации угля АО «ПАЗ» / Д.Г. Малыхин, **А.Н. Нагорнов**, Р.Ш. Загруднинов, С.Н. Шитова // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008): Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1-4 октября 2008 г.– Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2008.– С. 348-354.

10. **Нагорнов, А.Н.** Сравнительный анализ работы газогенератора Лурги на парокислородном и паровоздушном дутье / А.Н. Нагорнов, Р.Ш. Загруднинов, С.Н. Шитова, П.К. Сеначин // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики

(ЭЭТПЭ-2008): Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1-4 октября 2008 г.– Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2008. – С. 355-361.

11. Нагорнов, А.Н. Физико-химические основы горения и газификации углей в плотном слое газификатора Лурги / А.Н. Нагорнов, Р.Ш. Загрутдинов, П.К. Сеначин, С.М. Кисляк, Р.М. Утемесов // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008): Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1-4 октября 2008.– Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2008. – С. 380-397.

12. Загрутдинов, Р.Ш. Опыт газификации в плотном слое с паровоздушно-кислородным дутьем при различных концентрациях кислорода в дутье / Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов**, С.Н. Шитова, П.К. Сеначин // Международная научно-техническая конференция «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля».- Москва, ВТИ, 2009.- М.: Изд-во ВТИ, 2009.- С. 185-194.

13. Загрутдинов, Р.Ш. Применение технологии газификации твердых топлив в различных отраслях промышленности Республики Казахстан / Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов**, Н.А. Нагорнов, Д.Г. Малыхин, А.Т. Ибрагимов, Н.П. Деревянкин // Энергетика, экология, энергосбережение: Материалы I Международной научно-технической конференции / Усть-Каменогорск, 2-4 июня 2005 г. – Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГТУ, 2005. - С. 144-146.

14. Рыжков, А.Ф. Перспективы газогенераторных технологий и их внедрение в промышленной энергетике/ А.Ф. Рыжков А.Ф., В.Е. Силин, Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов** // Труды 3-й Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение, оптимизация энергопотребления и обеспечение экологической безопасности на предприятиях металлургической, горной и нефтехимической промышленности» / Санкт-Петербург, 25-27 апреля 2005. – С.-Пб: Изд-во: «Санкт-Петербургская электротехническая компания», 2005. – С. 61-62.

15. Загрутдинов, Р.Ш. Экономические аспекты перевода теплопотребляющих установок промышленных предприятий Восточно-Казахстанской области на сжигание генераторного газа, полученного из бурого или каменного угля / Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов**, Н.А. Нагорнов, А.Т. Ибрагимов, Н.П. Деревянкин // Энергетика, экология, энергосбережение: Инвест-форум Восточно-Казахстанской области / Тезисы докладов. - Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГТУ, 2005. - С. 31-32.

16. Загрутдинов, Р.Ш. Наладочные испытания газогенераторов типа Лурги на паровоздушном дутье / Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов**, П.К. Сеначин // Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии: «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (ЭЭТПЭ-2007): Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием./ Барнаул, 17-20 октября 2007. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2007. – С. 123-124.

17. Загрутдинов, Р.Ш. Анализ работы газогенераторов Лурги при парокислородном и паровоздушном дутье / Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов**, С.Н. Шитова, П.К. Сеначин // Всероссийский семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике: Тезисы докладов / Ин-т теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Сибирский федеральный ун-т, г. Красноярск, 13-15 мая 2009 г.- Новосибирск: ИТ СО РАН, 2009.- С. 36.

18. Нагорнов, А.Н. Технологии газификации углей и производства моторных топлив: Учебное пособие / Р.Ш. Загрутдинов, А.Н. Нагорнов, П.К. Сеначин.- Барнаул: Изд-во ОАО «Алтайский дом печати», 2008.- 96 с.

19. Загрутдинов, Р.Ш. Технологии газификации в плотном слое: Монография / Р.Ш. Загрутдинов, **А.Н. Нагорнов**, А.Ф. Рыжков, П.К. Сеначин.- Барнаул: Изд-во ОАО «Алтайский дом печати», 2009.- 296 с.