

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, старшего научного сотрудника Рябова Георгия Александровича на диссертацию Каграманова Юрия Александровича «Экспериментальное и численное моделирование механизма и процесса сухой сероочистки угольного синтез-газа в парогазовой установке», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы диссертации

Технология внутрицикловой газификацией твердого топлива (ПГУ ВЦГ) привлекает к себе внимание благодаря более высокой эффективности по сравнению с прямым сжиганием и использованием паросилового цикла. Особая важность ее использования в настоящее время связана с существенным снижением загрязняющих веществ. При этом не только снижаются выбросы традиционных загрязнителей, но и уменьшаются выбросы парниковых газов. Кроме того, технологии газификации твердых топлив являются основой для получения полезных продуктов, включая водород, метанол и другие. Во всех случаях содержание соединений серы в генераторном газе требует использования средств сероочистки. При этом применение высокотемпературной сухой сероочистки более выгодно, чем других технических решений с охлаждением и последующим нагревом генераторного газа. Таким образом, экспериментальные исследования и численное моделирование механизма и процесса сухой сероочистки синтетического газа является важной и актуальной задачей.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах. Их обоснованность подтверждается корректной постановкой задач, применением апробированных математических моделей и программных продуктов, а также хорошим совпадением результатов численного моделирования. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, вполне обоснованы.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность основных научных результатов диссертации Каграманова Ю. А. обеспечивается выбранной методологией исследования, результатами анализа современных отечественных и зарубежных научных трудов по исследуемой проблематике. Она также обеспечивается применением высокоточного современного оборудования с высокой чувствительностью изменения параметров процесса хемосорбции и восстановления частиц твердого сорбента, сопоставлением поисковых экспериментов с известными литературными данными и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, использованием современного программного обеспечения.

Полученные результаты опубликованы в 22 статьях, из них 10 в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 9 статей в журналах, индексируемых в международной базе Scopus и Web of Science, 1 монография, 1 патент РФ на полезную модель. Практические рекомендации по применению новых методических разработок прошли апробацию и внедрены в деятельность предприятия: ООО «Генерация инжиниринг», о чём свидетельствуют соответствующие акты внедрения. Изложенное позволяет сделать заключение о достоверности положений, выносимых на защиту.

Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа Каграманова Юрия Александровича состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и 7 приложений. Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 31 таблицу. Список литературы включает 152 зарубежных и русскоязычных источника.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, разработанность в России и мире, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая ценность работы.

В **первой главе** рассмотрены особенности применения системы сухой сероочистки синтетического газа в составе ПГУ ВЦГ. Проанализированы химические процессы сухой сероочистки этого газа. Дан обзор методов расчета систем с циркулирующим кипящим слоем. Представлен обзор подходов к решению кинетических задач. Рассмотрены подходы к

объединению методов термодинамики, газодинамики многофазных потоков и кинетики. С помощью представленного анализа научно-технической информации сформулированы основные цели и задачи исследования.

В **главе 2** дано описание экспериментов. Дана общая методика проведения экспериментов. Эксперименты с сорбентами сероочистки были разбиты на два этапа: определение параметров сорбентов и термоаналитический. Приведено описание экспериментального оборудования и дано определение параметров сорбентов. Оценена погрешность определения всех экспериментальных параметров.

В **третьей главе** представлен физико-математический аппарат, составляющий основу численного анализа навески термогравиметрического реактора, стенда ВТИ с циркуляционным кипящим слоем, стенда *DOE* (департамента энергетики США) и промышленного реактора с ЦКС очистки синтетического для перспективной ПГУ-ВЦГ. Для расчета реактора сухой сероочистки использовались три модели: газодинамическая, термодинамическая и кинетическая. Разработана методика многофакторного анализа термодинамических данных перспективной ПГУ с внутрицикловой газификацией кузнецкого угля. Описана методика определения температуры сухой сероочистки для достижения оптимальных режимов и экономичности использования сорбента.

В **четвертой главе** рассмотрены результаты экспериментального анализа термоустойчивости оксида цинка в нейтральной и окислительной среде. Приведены опытные данные хемосорбции сероводорода оксидом цинка. Представлены результаты валидации кинетической, газодинамической, термодинамической и связанной модели. Валидация кинетической и термодинамической модели выполнялась по литературным и экспериментальным данным.

В **пятой главе** рассмотрены вопросы прогнозирования работы блока сероочистки. Даны результаты численного моделирования циркуляционного контура. Для определения содержания сероводорода на выходе из реактора проведен кинетический расчет и даны его результаты. Выполнен многофакторный анализ результатов кинетического расчета. Показано, что если проводить сероочистку при температуре 350 °С, то применение сухой сероочистки остается выгоднее традиционной мокрой холодной сероочистки.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, рекомендации по их применению и перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Содержание автореферата в сжатом виде полностью отражает основное содержание диссертации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Процесс сероочистки представлен единой моделью физико-химического механизма, состоящей из нескольких реакций и учитывающей конкурентный вклад каждой реакции за счет разработанной многокомпонентной (кинетической) модели физико-химических взаимодействий.
- Экспериментально определена динамика хемосорбции и побочных восстановительных процессов в диапазоне температур 300 – 1000 °С методом неизотермического ТГ анализа. Определены кинетические константы исследованных реакций.
- Количественно показана степень эффективности работы реактора сухой сероочистки при разных температурных режимах с учетом селективности целевых и побочных реакций. Спрогнозирована работа блока сероочистки при разных составах синтетического газа для 5 известных технологий. Обосновано расположение сероочистки в технологической схеме ПГУ ВЦГ относительно шифт-реактора. Проведен многофакторный анализ данных расчета термодинамического цикла ПГУ ВЦГ, определена температура сухой сероочистки для поддержания максимальной мощности, КПД и снижения капитальных затрат.

Замечания по диссертации

Положительно оценивая диссертацию в целом, ее логику, обоснованность, достоверность, полученные новые научные результаты, теоретическую и эмпирическую базу исследования, следует выделить следующие дискуссионные положения, недостатки и замечания:

1. В таблице 1.3 на стр. 19 содержание азота при воздушной и кислородной газификации одинаково? Никогда не видел данных, чтобы теплота сгорания (так правильно, не калорийность) газа при воздушной газификации была выше, чем при кислородной.

2. На стр. 59 приведены довольно не обычные характеристики, по которым далее ведется оптимизация. В частности:

- Пропускная способность выражается как обратная величина сопротивления реактора. Тогда она будет бесконечной в пустом реакторе. Обычно для реакторов с ЦКС важна пропускная способность системы возврата, которая выражается в виде расхода на площадь.

- Почему нижняя граница контрольного интервала, принятая в расчетах составляет 500 ppm? Это ведь не требования к синтетическом газу, в котором содержание соединений серы должно быть много меньше.
- Понятие экономичности использования сорбента кажется несколько натянутым. Необходимы пояснения. Получается, что чем больше масса сорбента, тем экономичней, но он стоит денег!

3. На стр.66 – 68 приводится сравнение результатов расчета и опытных данных ВТИ. Это здорово, что все так хорошо сошлось, но где же описание расчетной модели? Совершенно не понятно, какая там струя прилипает к стенке, что за модель смешения как я понял линии возврата частиц после пневмоклапана с подъемным потоком? Как это связано с рисунком 4.6 на стр. 68 – это же совсем другие условия!

4. Установки ВЦГ работают под давлением. Необходимо было бы упомянуть, пригодны ли предложенные автором подходы к этим условиям.

5. Имеется ряд неточностей и ошибок в тексте диссертации на стр.16 и 17. На рис. 1.2 не все элементы названы. Действительно ли реактор овальный, может быть круглый? Стр. 23, табл.1.6. Данные нужно приводить не в день, а в сутки, и не в фунтах, а в кг. Почему-то два рис. 4.6. Есть грамматическая ошибка в выводе 5 на стр. 68.

Заключение

Диссертация Каграманова Юрия Александровича на тему «Экспериментальное и численное моделирование механизма и процесса сухой сероочистки угольного синтез-газа в парогазовой установке», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Достижение поставленной в диссертационном исследовании цели сопряжено с решением целого комплекса задач, имеющих теоретическое и прикладное значение.

Диссертация и автореферат соответствуют пунктам Паспорта специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника: 6. Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях. 7. Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси.

Автореферат диссертации Ю. А. Каграманова полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования. По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9-14 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Каграманов Юрий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, старший научный сотрудник,
АО «ВТИ», г. Москва, заведующий лабораторией специальных котлов
отделения парогенераторов и топочных устройств электростанций
Рябов Георгий Александрович



Контактная информация:

Акционерное Общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», Россия, 115280, г. Москва, 3-й Автозаводский проезд, д.4, к.1, тел.: +7 (495) 137 77 70, доб. 2641. Адреса электронной почты: garyabov@vti.ru, georgy.ryabov@gmail.com

«20» февраля 2025 г.

Подпись Рябова Георгия Александровича заверяю:

Первый заместитель научного
руководителя АО «ВТИ»
(Доверенность №42/Д
от 05.09.2024)



Тарадай Дмитрий Вадимович