

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Рябова Георгия Александровича
на диссертацию

Никитина Александра Дмитриевича

«Влияние водяного пара на физико-химические процессы в парогазовой установке с
внутрицикловой газификацией твердого топлива»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность работы определяется необходимостью повышения эффективности использования угля, как в отношении КПД выработки электроэнергии, так и в плане вредных выбросов. При этом в последнее время уделяется особое внимание выбросам углекислого газа. Технология внутрицикловой газификации угля с использованием парогазового цикла (ПГУ-ВЦГ) позволяет решить эти вопросы, но капитальные и эксплуатационные затраты ПГУ-ВЦГ пока еще очень велики. Несмотря на значительное количество исследований и имеющийся опыт промышленных установок, ряд вопросов остаются еще не достаточно изученными. Соискатель справедливо считает, что повышению эффективности ПГУ-ВЦГ способствует увеличение химического КПД газогенератора, повышение температуры синтез-газа перед ГТУ за счет применения горячей сухой сероочистки и использование паровоздушного дутья. Поэтому тематика и результаты диссертационной работы являются, безусловно, актуальными.

Цель и сильные стороны работы

Основной целью диссертационной работы является получение новых знаний о физико-химических особенностях взаимодействия водяного пара с частицами топлива в поточном газогенераторе с паровоздушным дутьем и взаимодействия полученного синтетического газа с частицами сорбента в узле сероочистки, а также оценка влияния добавки водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) на ее работу.

Сильной стороной диссертационной работы является проведение экспериментальных исследований влияния добавки водяного пара на процесс воздушной газификации каменного угля в поточной установке. Важным является разработка и верификация математической модели двухступенчатого поточного газогенератора. Следует отметить также результаты экспериментальных исследований влияния состава полученного при добавке пара газа на термическую устойчивость сорбента для горячей сероочистки и определение кинетических констант реакций разложения сорбента. Благодаря термодинамическим расчетам удалось определить зависимость температуры горячей сероочистки от добавки водяного пара в газогенератор с учетом условий термической устойчивости сорбента и остаточного содержания соединений серы. Интерес представляют также оценки влияния добавки водяного пара на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- проведены экспериментальные исследования паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля марки Д в поточном реакторе в широком диапазоне соотношения пар/уголь при постоянном времени пребывания частиц угля в реакторе;

- предложена и верифицирована одномерная модель двухступенчатого поточного газогенератора, учитывающая внутреннее реагирование, изменение размера частиц угля в ходе газификации, зависимость порядка реакции паровой газификации от концентрации H_2O , распределение частиц угля по размерам и рециркуляцию коксозольного остатка;
- экспериментально определены кинетические константы реакций разложения сорбента на основе оксида цинка при взаимодействии с компонентами синтез-газа, предложена модель для расчета предельной температуры процесса горячей сероочистки синтез-газа по условию термической устойчивости сорбента, и получены новые данные по предельной температуре сероочистки;
- выполнена количественная оценка влияния добавки водяного пара на вход в ПГУ-ВЦГ на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ с воздушной газификацией угля и горячей сероочисткой синтез-газа.

Степень обоснованности научных положений. Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах.

Достоверность основных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректной постановкой задач, использованием апробированных методик экспериментов и расчетов, а также сравнением результатов численного анализа с экспериментальными и расчётными данными, в том числе представленными в литературных источниках.

Теоретическая значимость работы

Полученные экспериментальные результаты вносят вклад в понимание физико-химических процессов, происходящих при газификации твердого топлива и сероочистке синтез-газа, и могут быть использованы при верификации результатов математического моделирования указанных процессов. В результате экспериментальных и расчетных исследований выявлен немонотонный характер зависимости эффективности газификации твердого топлива от добавки водяного пара в газогенератор, что приводит к немонотонному изменению параметров всех последующих узлов ПГУ-ВЦГ. Выявлены диапазоны добавки водяного пара, оказывающие положительный эффект на процессы газификации угля, сероочистки синтез-газа и эффективность ПГУ-ВЦГ в целом.

Практическое значение диссертационной работы заключается в следующем:

- модель двухступенчатого поточного газогенератора позволяет с использованием результатов лабораторных анализов проб твердого топлива рассчитать режимные параметры паровоздушной и парокислородной газификации твердого топлива;
- полученные зависимости режимных параметров ПГУ-ВЦГ от добавки водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) могут быть использованы при разработке перспективной ПГУ для производства электрической и тепловой энергии с высокой эффективностью и минимальными выбросами вредных веществ;
- результаты исследования влияния водяного пара на поточную газификацию кузнецкого каменного угля использованы в рамках НИР по гранту РФФИ №19-38-

50071. Одномерная модель газогенератора использована при разработке опытно-промышленной печи для производства активированного угля методом паровоздушной газификации древесного угля.

Апробация работы

Материалы, отражающие содержание диссертационной работы, представлены в 10 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные системы цитирования *Scopus* и *Web of Science*. Получен 1 патент РФ на полезную модель. Апробация материалов осуществлялась достаточно широко на 15 семинарах, форумах, университетских, всероссийских и международных конференциях. Публикации в должной мере отражают содержание работы.

Структура, объём и основное содержание работы

Диссертация Никитина Александра Дмитриевича состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 191 источник, и 9 приложений. Диссертация изложена на 196 страницах, включает 66 рисунков и 46 таблиц.

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

Первая глава посвящена аналитическому обзору опубликованных в литературе результатов исследований по трем направлениям: технологические решения по совершенствованию ПГУ-ВЦГ, влияние водяного пара на процесс газификации твердого топлива и на процесс горячей сероочистки синтез-газа. Показано, что влияние водяного пара на химический КПД $\eta_{\text{хим}}$ определяется соотношением противоположных по знаку факторов. Положительными факторами являются увеличение концентрации вступающих в реакции газификации угля H_2O и CO_2 (за счет реакции водяного сдвига), а также ускорение газификации топлива за счет более высокой реакционной способности H_2O по сравнению с CO_2 . Отрицательными факторами является снижение температуры и времени пребывания частиц в газогенераторе. В узле сероочистки при увеличении содержания H_2O в синтез-газе с одной стороны замедляется целевая реакция поглощения соединений серы и увеличивается их равновесная концентрация на выходе из узла сероочистки, но с другой стороны блокируются реакции разложения сорбента. На основе обзора предложены направления исследований.

Во **второй главе** представлено экспериментальное исследование влияния добавки водяного пара на развитие процесса воздушной газификации кузнецкого каменного угля марки Д. Эксперименты проводились на модернизированной для целей исследования поточной установке ИТ СО РАН, с использованием двух типов помола угля: на шаровой барабанной мельнице (ШБМ) и дезинтеграторе. В первой серии применен обычный подход, когда пар добавляется при неизменных расходах угля и воздуха, что уменьшает время пребывания частиц угля в установке. Во второй серии поддерживалось постоянное время пребывания частиц за счет снижения расходов угля и воздуха при подаче пара. Независимо от подхода, добавка водяного пара к воздушному дутью оказывает положительный эффект. Зависимость $\eta_{\text{хим}}$ от соотношения пар/уголь имеет немонотонный

характер. В сериях 1 и 2 максимум $\eta_{\text{хим}}$ достигается при практически одинаковом значении добавки пара (около 0,4 кг/кг угля), но значительно различается характер изменения $\eta_{\text{хим}}$ при увеличении добавки пара. Относительно низкие значения $\eta_{\text{хим}}$ и высокие значения H_2/CO автор объясняет неполной конверсией угля вследствие ограниченной длины реакционной камеры. Достоверность полученных результатов подтверждается сходимостью материального и теплового балансов с невязкой менее 4 %.

В **третьей главе** представлено расчетное исследование влияния добавки водяного пара на процесс воздушной газификации твердого топлива в промышленном двухступенчатом поточном газогенераторе типа *MHI* с использованием модифицированной одномерной модели. Расчеты проведены при неизменной конструкции и варьировании соотношения пар/уголь при постоянном теплонапряжении по сечению. Для каждого исследованного помола угля (ШБМ и дезинтегратор) выполнены три серии расчетов: «проектный» режим (отношение рециркулируемый КЗО/уголь $R \approx 0,15$ кг/кг; $\eta_{\text{хим}} \approx 75$ %), «пиролизный» режим ($R \rightarrow \max$, в первую ступень газогенератора подается только КЗО) и «поточный» режим ($R \rightarrow \min$, рециркуляция КЗО отсутствует). Для анализа результатов расчетов значения контрольных параметров приводились к значениям при воздушной газификации. Показано, что изменение $\eta_{\text{хим}}$ при добавке пара связано с изменением порядка реакции паровой газификации. Автором выделено две зоны: зона А, в которой порядок реакции газификации по H_2O $n=1$, и зона Б, в которой порядок реакции газификации по H_2O $n=0$. Увеличение $\eta_{\text{хим}}$ в зоне А обусловлено ускорением газификации и уменьшением коэффициента расхода воздуха α . В зоне Б добавка пара не ускоряет газификацию и снижает температуру, что приводит к увеличению α , сокращению времени пребывания угля в газогенераторе и уменьшению $\eta_{\text{хим}}$.

В **четвертой главе** рассмотрено влияние изменения состава синтез-газа на рабочую температуру сероочистки при использовании сорбента на основе оксида цинка. Проведены экспериментальные исследования термической устойчивости сорбента методом термогравиметрического анализа. Для контроля состава смеси газов соискателем разработана методика газового анализа с применением масс-спектрометра. Для определения температуры сероочистки по условию остаточной концентрации H_2S в синтез-газе проведены термодинамические расчеты зависимости равновесного состава газа на выходе из узла сероочистки от температуры и содержания H_2O . Получена зависимость предельной температуры сероочистки, при которой остаточное содержание H_2S в синтез-газе равно допустимому значению для ПГУ-ВЦГ. Результаты расчета предельной температуры сероочистки показали, что во всех случаях температура сероочистки определяется термической устойчивостью сорбента, основной прирост которой приходится на зону А (порядок реакции газификации по H_2O $n=1$).

В **пятой главе** выполнена количественная оценка влияния водяного пара на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ. Предложена методика термодинамического расчета цикла ГТУ с учетом охлаждения лопаток и зависимости температуры продуктов сгорания на входе в газовую турбину от состава синтез-газа. Методика расчета энергетической части ПГУ-ВЦГ верифицирована по литературным данным. С использованием результатов расчета процессов газификации (глава 3) и сероочистки (глава 4) выполнены расчеты ПГУ-ВЦГ с двухступенчатым газогенератором *MHI*, горячей сероочисткой синтез-газа, ГТУ марки *Siemens SGT5-4000F* и трехконтурным котлом-утилизатором. Показано, что увеличение КПД-нетто ПГУ-ВЦГ при добавке пара в

газогенератор имеет немонотонный характер, связанный с изменением порядка реакции газификации по H_2O . Максимальный прирост КПД-нетто составляет 0,1–0,6 % абс. в зависимости от режима газификации угля. Капитальные затраты на ПГУ-ВЦГ при добавке пара в пиролизном режиме газификации снижаются на 1–5 % отн., но в поточном режиме газификации – увеличиваются на 1–2 % отн.

В **выводах** сформулированы основные результаты работы, рекомендации по их применению и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Содержание автореферата в сжатом виде полностью отражает основное содержание диссертации.

Соответствие тематики и содержания работы выбранной специальности

Тема диссертации и результаты исследований соответствуют паспорту научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, именно:

Пункт 3 – Исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии.

Пункт 7 – Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси.

Личный вклад автора

Автором лично проведен анализ научно-технической литературы, выполнено планирование, проведение, обработка и анализ результатов экспериментов по паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля в модернизированной по плану автора поточной установке, а также по разложению сорбента на основе оксида цинка при взаимодействии с компонентами синтез-газа. Выполнена модификация и верификация одномерной модели поточного двухступенчатого газогенератора, проведены расчеты паровоздушной газификации угля, сероочистки синтез-газа и цикла ПГУ-ВЦГ, выполнен анализ полученных результатов. Обсуждение результатов и формулирование окончательных выводов проводилось совместно с научным руководителем.

Замечания и вопросы по диссертации

1 Стр. 62, 63. Автор без пояснений сравнивает данные по газификации в потоке с газификацией отдельной крупной частицей электродного угля и плотным слоем кокса ирша-бородинского угля. К тому же и температуры разные. Совпадение данных это случайность или закономерность?

2 Стр. 66. Исходными данными являются характеристики КЗО, но на мой взгляд (если это возврат уловленных частиц) характеристики должны рассчитываться, а не задаваться.

3 Стр. 94, рис. 3.12. Могут ли быть связаны различия в значениях концентраций для размола в ШБМ и с помощью дезинтегратора с отличием в температурных режимах?

4 В разделе по расчетам промышленного газогенератора не ясно какие это режимы: с постоянным временем пребывания или нет?

5 Стр. 106. Почему выбрана такая скорость нагрева и такие расходы дутья? Почему столь высоко содержание водорода (№ 2.2 73 % и № 3.1 93%)?

6 Выбор состава газов при проведении опытов с сорбентом для сероочистки недостаточно обоснован. Может быть правильно было бы сделать модельный газ? Сорбент ведь

разлагается и реагирует в том числе с SO₂.

7 Стр. 138. Необходимы пояснения – как разбивались зоны А и Б? Или 0,5 произвольно, как в выводе на стр. 143, или 0,3 – 0,5, как в выводе 2.

8 Имеется ряд редакционных замечаний по оформлению работы, например: на рисунках 1.1 – 1.3 надписи на английском, обозначения на рис. 2.6, на рис. 3.1 отсутствует сепаратор частиц из потока генераторного газа, отсутствуют данные по пару на стр. 84 и в табл. 3.6.

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень работы.

Заключение

Диссертация Никитина А. Д. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены новые знания о физико-химических особенностях взаимодействия водяного пара с частицами топлива в поточном газогенераторе. Они могут быть использованы при разработке перспективной ПГУ для производства электрической и тепловой энергии с высокой эффективностью и минимальными выбросами вредных веществ. Самостоятельно полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Основные идеи работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. Работа полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Никитин Александр Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией
специальных котлов отделения
парогенераторов и топочных
устройств, д.т.н.,
старший научный сотрудник



Рябов Георгий Александрович
«14» мая 2021 г.

Почтовый адрес:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14,
Тел.: 8 (495) 234-76-30; 8 (495) 234-76-17,
E-mail: vti@vti.ru
Сайт: <http://vti.ru>

Подпись Рябова Г.А. удостоверяю:
Руководитель отдела
по управлению персоналом ОАО «ВТИ»



Картошкина Ирина Анатольевна