

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Лаврова Владислава Васильевича

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

В настоящее время большое внимание уделяется повышению экологической чистоты промышленности и энергетики и, в частности, снижению выбросов в атмосферу углекислого газа (декарбонизация). Снижение выбросов CO₂ возможно как за счет применения систем его улавливания и захоронения, так и за счет совершенствования технологии и повышения эффективности выработки энергии, что представляется более предпочтительным. Рассматриваемая в работе парогазовая установка с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) имеет высокую эффективность при минимальных выбросах вредных веществ.

Необходимо отметить, что Россия обладает значительными запасами угля, который является основным источником энергии на территории Сибири и Дальнего Востока. Связанные со сжиганием угля экологические проблемы в крупных городах этих регионов стоят достаточно остро.

Широкому внедрению ПГУ-ВЦГ препятствует сложность и высокая стоимость энергоустановки. Возможность повышения эффективности и снижения капитальных затрат ПГУ-ВЦГ за счет применения паровоздушного дутья представляет интерес и требует всесторонней и достоверной оценки. Тема диссертации, поставленные и решенные соискателем задачи, являются, безусловно, актуальными и имеют широкое практическое применение в промышленной теплоэнергетике.

Тема работы соответствует Перечню приоритетных направлений развития науки, технологии и техники РФ (п. 8), а также Перечню критических технологий РФ (п. 27).

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 191 источник, и девяти приложений. Диссертация изложена на 162 страницах, включает 66 рисунков и 46 таблиц.

Во *введении* приведена актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, структура работы.

В *первой главе* представлен обзор 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. Обосновано применение в составе ПГУ-ВЦГ поточного газогенератора с сухой топливоподачей и воздушным дутьем. Согласно обзору литературы, добавка пара может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на химический КПД газогенератора. Большая часть исследований показывает увеличение химического КПД газогенератора при добавке пара, но количественное значение варьируется от долей до десятка процентов. Как правило, зависимость химического КПД газогенератора от соотношения пар/топливо немонотонная, оптимальное соотношение пар/топливо различно

для каждого конкретного топлива. Показано, что зависимость эффективности ПГУ-ВЦГ в целом от добавки водяного пара в газогенератор с учетом физико-химических процессов в газогенераторе и узле сероочистки в широком диапазоне варьирования добавки водяного пара ранее не рассматривалась.

Во *второй главе* представлено экспериментальное исследование влияния добавки водяного пара на развитие процесса воздушной газификации кузнецкого каменного угля марки Д в модернизированной для целей эксперимента поточной установке ИТ СО РАН. В двух сериях реализован различный подход при исследовании влияния подачи пара. В первой серии пар добавлялся при неизменном расходе топлива и воздуха и оказывал положительное влияние только при малой добавке, когда время пребывания частиц угля в установке уменьшается незначительно. Во второй серии при добавке пара расходы топлива и воздуха уменьшались, что обеспечивало постоянное время пребывания частиц угля в установке. В результате обработки данных второй серии опытов выявлено, что скорость химической реакции водяного пара с углеродом топлива имеет первый порядок по водяному пару при его концентрации менее 15–20 % об. и нулевой порядок при большей концентрации, что совпадает с литературными данными для индивидуальной частицы и плотного слоя.

В *третьей главе* представлено расчетное исследование влияния добавки водяного пара на процесс воздушной газификации твердого топлива в промышленном двухступенчатом поточном газогенераторе типа МНІ с использованием модифицированной одномерной модели, учитывающей внутренне реагирование, распределение частиц угля по размерам и изменение порядка реакции паровой газификации. Модель верифицирована по экспериментальным данным, опубликованным в литературе. Проведены расчеты и определены зависимости параметров процесса паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля в промышленном двухступенчатом газогенераторе МНІ от добавки пара для двух типов помола (тонкий влажный и грубый сухой) и трех режимов: «проектный», «пиролизный» (максимально возможная рециркуляция коксозольного остатка) и «поточный» (полная конверсия угля, отсутствует рециркуляция КЗО). Зависимость хим. КПД газогенератора от соотношения пар/уголь носит немонотонный характер, связанный с изменением порядка реакции паровой газификации с первого до нулевого при увеличении добавки пара.

В *четвертой главе* рассмотрено влияние изменения состава синтез-газа на рабочую температуру сероочистки при использовании сорбента на основе оксида цинка. При определении предельной температуры сероочистки учитываются два условия: термическая устойчивость сорбента и эффективность сероочистки (остаточная концентрация H_2S в синтез-газе). Проведены экспериментальные исследования реакций взаимодействия оксида цинка с H_2 и CO методом термогравиметрического анализа в средах H_2 -Ar, CO -Ar, H_2 - H_2O , CO - CO_2 для определения температуры сероочистки по условию термической устойчивости сорбента. Для контроля состава среды разработана специальная методика обработки выходного сигнала масс-спектрометра. Получены зависимости кинетических констант в уравнении Аррениуса от концентрации H_2O и CO_2 в синтез-газе. Проведены термодинамические расчеты зависимости равновесного состава газа на выходе из узла сероочистки от температуры и содержания H_2O в синтез-газе. Получена зависимость предельной температуры сероочистки от концентрации H_2O , при которой остаточное содержание H_2S в синтез-газе равно предельному значению для ПГУ-ВЦГ. Определена предельная температура процесса сероочистки по условиям термической устойчивости сорбента и допустимого остаточного содержания соединений серы

для составов синтез-газа, полученных в третьей главе при расчете паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля.

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. Выполнена верификация расчета энергетической части ПГУ-ВЦГ по литературным данным для ПГУ-ВЦГ с двухступенчатым воздушным газогенератором фирмы МНІ, холодной сероочисткой, ГТУ марки Siemens SGT5-4000F и двухконтурным котлом-утилизатором. Выполнены расчеты ПГУ-ВЦГ с паровоздушной газификацией угля, горячей сероочисткой синтез-газа, ГТУ марки Siemens SGT5-4000F и трехконтурным котлом-утилизатором с использованием результатов расчета газогенератора (глава 3) и узла сероочистки (глава 4) для количественной оценки влияния добавки водяного пара в газогенератор на эффективность и металлоемкость ПГУ-ВЦГ.

Диссертация написана логически последовательно, корректным с научной и технической точки зрения языком. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Научная новизна

В качестве научной новизны диссертационной работы следует отметить получение новых результатов экспериментальных исследований процесса поточной паровоздушной конверсии каменного угля и кинетики разложения оксида цинка в синтез-газе; разработку одномерной модели двухступенчатого поточного газогенератора, учитывающей 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; а также получение зависимостей эффективности, капитальных затрат и других параметров ПГУ-ВЦГ от добавки пара на ее вход.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. При проведении экспериментальных исследований применены апробированные методики измерений и высокоточные средства измерений. Использованные расчетные модели верифицированы с применением достоверных литературных источников. Выполнено сопоставление результатов экспериментальных и расчетных исследований с литературными данными.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы подтверждается оформленным соискателем патентом РФ на полезную модель. Предложенная модель двухступенчатого поточного газогенератора позволяет по данным лабораторных анализов площади поверхности кокса топлива рассчитать режимные газификации твердого топлива. Полученные в результате работы зависимости режимных параметров ПГУ-ВЦГ от добавки водяного пара 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. Одномерная модель газогенератора имеет практическое применение при разработке опытно-промышленной печи для производства активированного угля методом паровоздушной газификации древесного угля, что подтверждено справкой о внедрении.

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 ИТ СО РАН и по разложению сорбента на основе оксида цинка при взаимодействии с компонентами синтез-газа на приборе термогравиметрического анализа NETZSCH STA 449 F3 УрФУ, 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.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. В рамках диссертационной работы проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси каменного угля, воздуха и водяного пара, а также компонентов синтез-газ и оксида цинка (соответствие п.7); выполнялось исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии (соответствие п.3).

Апробация работы и публикации

Результаты работы прошли широкую апробацию на более чем 10 конференциях всероссийского и международного уровня, включая ведущие конференции по теме исследования.

По теме исследования опубликовано 10 научных работ 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. Опубликованные автором работы соответствуют содержанию диссертации.

Вопросы и замечания по работе:

1. Для измерения температур при проведении экспериментов по паровоздушной газификации угля в поточной установке использованы хромель-алюмелевые термопары. Известно, что основными их недостатками являются чувствительность к деформациям, окисление выше 1000 °С, невозможность применения в углеродных средах из-за науглероживания спая. В тексте диссертации не указаны размеры защитного чехла и диаметр термоэлектродов. С чем связано постоянное значение температуры T1 на рисунке 2.4.?

2. Каким образом в модели процесса газификации учитывается теплообмен между частицами и газом?

2. На основании каких данных задавались характеристики пор (объем и площадь поверхности) кузнецкого каменного угля при расчете промышленного газогенератора?

3. Расчет по предложенной в работе одномерной модели двухступенчатого газогенератора включает в себя несколько циклов с итерациями. Для облегчения понимания методики расчета было бы целесообразно привести алгоритм расчета. Кроме того, желательно было бы привести численные результаты расчетов теплового и материального балансов с указанием величины невязки.

4. Как будут располагаться экспериментальные ТГ-кривые разложения сорбента при изменении скорости нагрева прибора ТГА?

5. Чем обусловлено применение трёхконтурного котла-утилизатора и выбор значений давления и температуры перегретого пара в контурах при расчете схемы ПГУ-ВЦГ?

6. Имеется несколько замечаний и пожеланий по оформлению диссертации. В частности, оформление формул как части предложений (отсутствуют в конце запятые и точки). В отдельных таблицах 5-й главы отсутствуют заголовки (5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.8-5.10). В подрисуночной подписи к рисунку 1.8 допущена опечатка в ссылке на источник. На рисунке 1.12 обрезана подпись горизонтальной оси. В подписи обозначений на рисунке 4.6, б отсутствует знак %. Желательно при изложении уже свершившихся фактов использовать глаголы не в настоящем, а прошедшем времени, например, «использованы», «применены», «рассмотрены», вместо «используются», «применяются», «рассматриваются» и др.

Приведенные вопросы и замечания не влияют на основные результаты, полученные в работе, и не снижают ее научной и практической значимости.

Диссертационная работа Никитина А.Д. является в целом завершенным исследованием, качественно оформлена, написана грамотно и понятно.

Заключение

Представленная диссертация на тему «Влияние водяного пара на физико-химические процессы в парогазовой установке с внутрицикловой газификацией твердого топлива» представляет собой завершенное квалификационное исследование, в котором рассмотрено влияние водяного пара на процессы газификации угля и сероочистки синтез-газа и получены количественные оценки и рекомендации по повышению эффективности и снижению капитальных затрат ПГУ-ВЦГ. Работа соответствует заявленной специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и отрасли технических наук. По объему выполненных исследований, научному содержанию и практической значимости результатов работа полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ. Автор работы, Никитин Александр Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

Лавров Владислав Васильевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии Департамента металлургии и металловедения Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
телефон: 8 (343) 375-44-51
e-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Подпись В.В. Лаврова заверяю




В.В. Лавров

ДОКУМЕНТОВЕД УДИОВ
ГАФУРОВА А. А.