Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

На правах рукописи

Халид Хамед Эльшейх Эльхаг

Снижение вредных выбросов, включая парниковые газы, при кислородном сжигании твердого топлива в циркулирующем кипящем слое

05.17.07 Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» на кафедре химической технологии углеродных материалов

Научный руководитель: Бухаркина Татьяна Владимировна, доктор химических

наук, профессор, зав. кафедрой химической технологии углеродных материалов $\Phi\Gamma$ ОУ ВО «Российский химико-тех-

нологический университет имени Д. И. Менделеева»

Научный консультант: Рябов Георгий Александрович, доктор технических наук,

зав. лабораторией специальных котлов ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового красного знамени теплотех-

нический научно-исследовательский институт»

Официальные оппоненты: Эпштейн Светлана Абрамовна, доктор технических наук,

профессор, зав лабораторией физико-химии углей Национального исследовательского технологического универси-

тета «МИСиС»

Пешнев Борис Владимирович доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива имени А.Н. Башкирова ФГОУ ВО «МИРЭА — Российский техно-

логический университет»

Гартман Томаш Николаевич доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой информатики и компьютерного проектирования ФГОУ ВО «Российский химико-техноло-

гический университет имени Д. И. Менделеева»

Защита состоится 15 ноября в 10.00 на заседании диссертационного совета РХТУ.Р.04 при РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференцзале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» https://muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан	‹ ‹	»	2020
----------------------	------------	---	------

Ученый секретарь диссертационного советаРХТУ.Р.04 д.х.н. профессор

Бухаркина Т.В.

Общая характеристика работы

Актульность темы: Примерно треть глобальной антропогенной эмиссии диоксида углерода связана с централизованным производством энергии из органического топлива, поэтому методы снижения этой составляющей представляют большой интерес. Меры по повышению эффективности энергопроизводства и потребления, переход на сжигание газа вместо угля или мазута, разведение и восстановление лесов в краткосрочной перспективе являются основным способом снижения антропогенной эмиссии СО₂. Однако реализации первичных мер (энергосбережение, переход на сжигание газа и т.п.) недостаточно для достижения целей Конвенции ООН об изменении климата – стабилизации атмосферной концентрации диоксида углерода на безопасном для человечества уровне (в настоящее время концентрация СО₂ в атмосфере составляет около 370 ррту, тогда как в предшествующие 400 тыс. лет она находилась на уровне 200 – 300 ррту).

В связи с этим в последние годы в развитых странах, а также рядом международных организаций и крупнейших корпораций, развернуты программы исследований возможностей снижения эмиссии CO_2 за счет более дорогостоящих мер, принятие которых рассчитано на средне- и долгосрочную перспективу: сжигание топлива с пониженным содержанием углерода, улавливаниедиоксида углерода из дымовых газов и его последующее захоронение (или утилизация), а также ряд других.

Так как сложности с улавливанием CO₂ в значительной степени связаны с его низкой концентрацией в дымовых газах, альтернативой может служить использование кислорода вместо воздуха при сжигании топлива. Кислородное сжигание топлива позволяет получить дымовые газы с содержанием CO₂ более 90 % и небольшим количеством неконденсирующихся газов. При реализации метода необходимо обеспечить рециркуляцию части дымовых газов, вводя их в зону горения так, чтобы создать необходимые температурные условия. Установки с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) обладают некоторым преимуществом по сравнению с факельными при использовании кислородного сжигания. Турбулентная природа зоны слоя обеспечивает качественное смешение твердых частиц и их взаимодействие с газом. Высокая теплоемкость материалов на линии возврата и уровень охлаждения этих частиц влияет на способность установок с ЦКС поддерживать практически неизменную температуру слоя, что делает возможным ожижение концентрацией кислорода. Высокая концентрация кислорода позволяет снизить рециркуляцию дымовых газов и уменьшит затраты электроэнергии на собственные нужды.

Целью настоящей работы является комплексное снижение вредных выбросов (двуокиси углерода, оксидов азота и серы, закиси азота) при сжигании твердых топлив в энергетических котлах с циркулирующим кипящим слоем. Основные задачи включают в себя моделирование процессов образования и подавления вредных выбросов при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией СО₂, расчетные исследования влияния свойств биомассы на выбросы оксидов азота, исследование влияния гидродинамических параметров на снижение выбросов оксидов серы путем подачи известняка в топку с циркулирующим кипящим слоем, обобщение результатов и разработка рекомендаций по комплексному снижению вредных выбросов.

Объект исследования: Лабораторная установка мощностью 10 кВт с циркулирующим кипящим слоем, совместное сжигание угля и биомассы, с воздушным и кислородным сжиганием.

Методология и методы исследования: Методология работы заключается в анализе современных литературных источников и на его основе постановке проблемы, описании предмета исследования и теоретических подходов к решению проблемы, проверке теоретических предложений путем математического моделирования и верификации результатов (сравнение с результатами экспериментов), интерпретации полученных результатов и разработке практических предложений.

Научная новизна:

Научная новизна работы заключается в получении новых знаний в области сжигания топлив в установках с циркулирующим кипящим слоем в среде кислорода с рециркуляцией CO₂. В частности, получены:

- новые данные по влиянию режимных параметров на образование и подавление выбросов двуокиси и закиси азота;
- новые данные по влиянию свойств биотоплив на выбросы оксидов азота;
- новые данные по влиянию гидродинамических параметров на связывание серы путем подачи известняка или оксида кальция в топку;
- даны рекомендации по минимизации выбросов оксидов азота и серы в условиях сжигания в среде кислорода с рециркуляцией CO₂ в установках с циркулирующим кипящим слоем.

Теоретическая и практическая значимость работы: В научном отношении полученные результаты являются дополнительным вкладом в формирование физических пред-

ставлений об особенностях образования и снижения вредных выбросов при кислородном сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое. В прикладном отношении разработанный метод оценки вредных выбросов оксидов азота и серы, полученные экспериментальные данные и расчётные зависимости в совокупности представляют собой инструмент для проектирования топочных устройств котлов с ЦКС при сжигании в среде кислорода с рециркуляцией СО₂ и создают основу для комплексного снижения вредных выбросов.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование эффективности использования кислородного сжигания топлив для улавливания CO₂;
- результаты расчетных исследований влияния режимных параметров на образование и подавление выбросов двуокиси и закиси азота;
- результаты расчетных исследований влияния гидродинамических параметров на снижение выбросов оксидов серы путем подачи известняка в топку с циркулирующим кипящим слоем;
- результаты расчетных исследований влияния свойств биомассы на выбросы вредных выбросов;
- верификация результатов математического моделирования и рекомендации по оптимальным режимам сжигания.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается применением апробированных методов исследования, удовлетворительной воспроизводимостью результатов, непротиворечивостью с современными представлениями о процессах образования и подавления выбросов оксидов азота и серы в установках с ЦКС, удовлетворительным согласованием результатов расчётов с экспериментальными данными, а также выполненной оценкой погрешностей.

Личный вклад автора заключается в:

- анализе передовых достижений в области снижения вредных выбросов оксидов азота, закиси азота и окислов серы при сжигании твердых топлив в кипящем слое в условиях кислородного сжигания с рециркуляцией CO₂;
- выявлении особенностей влияния газовых компонентов и параметров сжигания на образование и подавление вредных выбросов при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂, включая совместное сжигание углей и биомассы;

- выборе оптимальных методов расчета вредных выбросов и проведении математического моделирования процессов образования и подавления вредных выбросов;
- сопоставлении результатов моделирования (верификации модели) с имеющимися экспериментальными данными и разработке рекомендаий по оптимальным режимам сжигания.

Апробация работы: Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на крупных международных научных конференциях:

- 1. III Международная научно-техническая конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла». Москва. 28-29 июня 2016 г.
- 2. 4-ая Международная научно-техническая конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла». Москва. 02-03 октября 2018 г.
- 3. Международная научно-техническая конференция «Экология в энергетике». Москва. 30-31 октября 2019 г.

Публикации: Результаты работы опубликованы в 6 статьях, в том числе рецензируемых в международных базах данных SCOPUS – 3, рекомендованных ВАК – 3.

Структура и объём работы: Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, условных обозначений, списка литературы на 6 страницах и приложений на 7 страницах. Текст диссертации иллюстрируют 110 рисунков и 43 таблицы 11 в основной части и 2 таблицы в приложении.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан краткий обзор состояния и развития технологии ЦКС, приведен опыт эксплуатации котлов с ЦКС, прежде всего в отношении вредных выбросов оксидов азота и серы. Приведены данные о технологии сжигания в среде кислорода с рециркуляцией СО₂. Особое внимание уделено анализу процессов образования и подавления вредных выбросов оксидов азота и серы. Дано сравнение механизмов и результатов опытов при сжигании в среде кислорода с рециркуляцией СО₂ и при воздушном сжигании..

Исходя из анализа передовых достижений в области снижения вредных выбросов оксидов азота, закиси азота и окислов серы при сжигании твердых топлив в кипящем слое в условиях кислородного сжигания с рециркуляцией CO_2 , определены задачи исследования:

- моделирование процессов образования и подавления вредных выбросов при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂;
- проведение расчетных исследований влияния свойств биомассы на выбросы оксидов азота;
- проведение исследований влияния гидродинамических параметров на снижение выбросов оксидов серы путем подачи известняка в топку с циркулирующим кипящим слоем;
- обобщение результатов и разработка рекомендаций по комплексному снижению вредных выбросов.

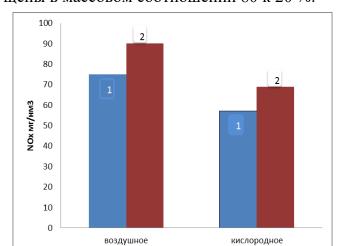
Во второй главе рассмотрены методические подходы к выбору наилучших условий переработки твердых топлив с минимальными вредными выбросами, включая парниковые газы. Дана краткая информация о различных технологиях улавливания СО2 на электростанциях, работающих на ископаемом топливе, таких как предварительная обработка, очистка после сжигания, сжигание в среде кислорода и сжигание в химических циклах. Рассмотрены возможности использования технологии сжигания в кипящем слое при улавливании СО2 и других выбросов в различных условиях сжигания. Показано, что использование технологии кипящего слоя в условиях сжигания в среде кислорода с рециркуляцией СО2 может быть одной из оптимальных. Рециркуляция твердой фазы обуславливает способность установок с ЦКС поддерживать неизменную температуру слоя, что делает возможным повышение концентрации кислорода до 70 %. Помимо возможности улавливания СО2, увеличивается КПД котла, снижаются его габариты и уменьшается объем дымовых газов.

Значительный эффект при этом может дать совместное сжигание ископаемых топлив с биомассой. При совместном сжигании угля и биомассы возникают как чисто балансовые эффекты (в биомассе мало серы и золы, как правило, меньше и азота), поэтому даже простое смешивание может привести к снижению выбросов загрязняющих веществ, особенно пыли и оксидов серы. Рост доли биомассы всегда приводит к снижению выбросов окислов серы, но излишний рост доли биомассы может приводить к уве-

личению выбросов оксидов азота. Использование математического моделирования позволит дать обоснованные рекомендации по режимам сжигания с минимальными вредными выбросами.

Применение метода сдерживается, однако, высокими затратами на получение кислорода. На основе выполненного технико-экономического анализа показано, что перспективу имеет технология двойного сжигания, когда котел может работать как на воздухе, так и на воздушно-кислородной смеси с рециркуляцией CO_2 .

Третья глава посвящена моделированию с помощью специализированных программных модулей. В частности, может быть использован ANSYS Chemkin-Pro – для моделирования сложных химических реакций в газовой фазе и на поверхности, особенно для NO_x. Расчеты изменения концентрации окислов серы SO₂ в динамических режимах проведены с использованием MATLAB. Исследования обеспечивают изучение выбросов NO_x от индивидуальное сжигание рисовая шелуха (РШ), древесная щепа (ДЩ), древесная мука (ДМ) и каменный уголь, затем выбитрается оптимальный вариант. На рисунке 1 представлены данные по сравнению расчетных и экспериментальных данных по концентрации оксидов азота при совместном сжигании каменного угля и щепы в массовом соотношении 80 к 20 %.



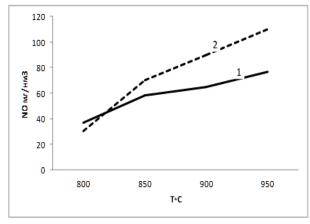


Рисунок 1 - Сравнение расчетных и экспериментальных данных по концентрации оксидов азота при совместном сжигании: каменный уголь 80 мас.%, древесная щепа 1 – эксперимент, 2 - расчет 20 мас.%. 1 - эксперимент, 2 - расчет

Рисунок 2 – Влияние температуры на концентрацию оксидов азота при совместном сжигании

На рисунке 2 представлены данные по влиянию температуры слоя при совместном сжигании с той же пропорцией угля к щепе (80/20%) при температурах слоя от

800 до 950°С. Выбросы оксидов азота увеличиваются с ростом температуры, причем расчетные данные также выше экспериментальных.

Расчеты влияния рециркуляции дымовых газов выполнены для доли рециркуляции 60% с позонной подачей газов в нижнюю часть реактора с ЦКС. При этом рассматривались условия совместного сжигания битуминозного (каменного) угля (80 %) и древесной щепы (20%). Расчетные и экспериментальные данные получены в условиях одинакового содержания кислорода в воздушном и кислородном сжигании и температуре 850 °C.

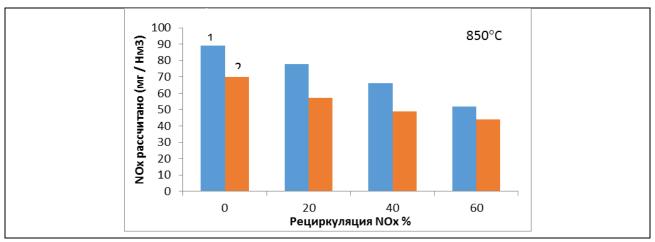


Рисунок 3 — Сравнение результатов рециркуляции NO_x при воздушном и кислородном сжигания от 0% до 60%1-воздушное сжигание, 2- кислородное сжигание

При кислородном сжигании выбросы оксидов азота снижаются приблизительно на 37 %. Образовавшийся NO восстанавливается, в основном, до N_2 . Расчетные данные дают значения выбросов несколько большие, чем экспериментальные (рис. 3).

Выполнено моделирование улавливания SO₂ при совместном сжигании угля (80%) и биомассы (20%) при кислородном и воздушном сжигания в условиях различной температуры и концентрации кислорода. Определены оптимальное размеры частиц известняка и влияние мольного отношения Ca/S, а также выполнено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных. Расчеты выполнялись для мощности установки 10 кВт. На рисунке 4 приведены концентрации окислов серы при сжигании угля и биомассы как отдельно, так и при совместном сжигании. Расчет образования SO₂ при сжигании угля и биомассы в различных атмосферах был выполнен по разработанной одномерной модели. На рис. 5 и 6 показаны результаты расчета для двух температур при сжигании в среде с содержанием кислорода 21 и 29 %. Рост температуры и содержания кислорода приводит к увеличению концентрации SO₂.

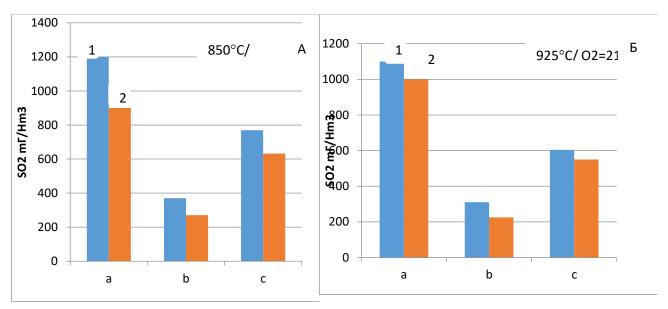


Рисунок 4 - Влияние золы биомассы на выбросы SO_2 при температуре 850 (A) и 925 0 С (Б)а) битуминозный уголь, б) древесная щепа с) смесь; 1- кислородное сжигание 2-воздушное сжигание

Основные позиции одномерной модели:

Уравнение энергии:

$$C_{p} \frac{\partial (p_{s}T)}{\partial T} = \frac{1}{r^{2}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{2} \lambda_{eff,s} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sum \Delta H_{i}r'.$$

Два граничных условия (центр частицы и поверхность)

Тепловой поток равен нулю в центре частицы. Условие на поверхности частицы связано с излучением и внешней тепловой конвекцией, которая позволяет обмен тепловой энергии между частицей и внешней окружающей обстановкой.

$$\begin{split} \frac{\partial T}{\partial r} &= 0, \qquad r = 0 \\ \lambda_{eff,s} &= \epsilon_r h(T_s - T_b) + d(T_s^4 - T_w^4) \end{split}$$

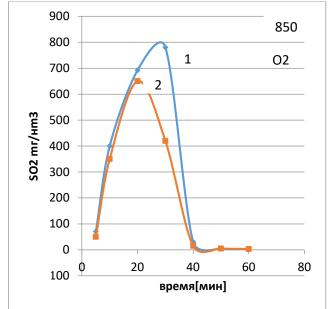
 $h=Nurac{\lambda_f}{dh}$ — коэффициент конвективного теплообмена между частицей и газом.

Уравнения сохранения массы для различных газов:

$$\varepsilon_{s} \frac{\partial C_{j}}{\partial t} = \frac{1}{r^{2}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{2} D_{eff,j} \frac{\partial C_{j}}{\partial r} \right) + \sum v_{ij} r_{j}' \frac{\partial C_{j}}{\partial r} = 0, \qquad r = 0.$$

$$D_{eff,j} \frac{\partial C_{j}}{\partial r} = k(C_{j,s} - C_{j,b}), \qquad r = R.$$

Коэффициент массообмена между одной частицей и объемным газом задается следующим выражениеми $K_j=sh\frac{D_j}{d}$.



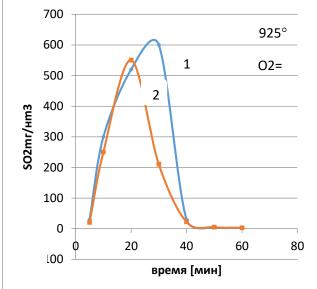


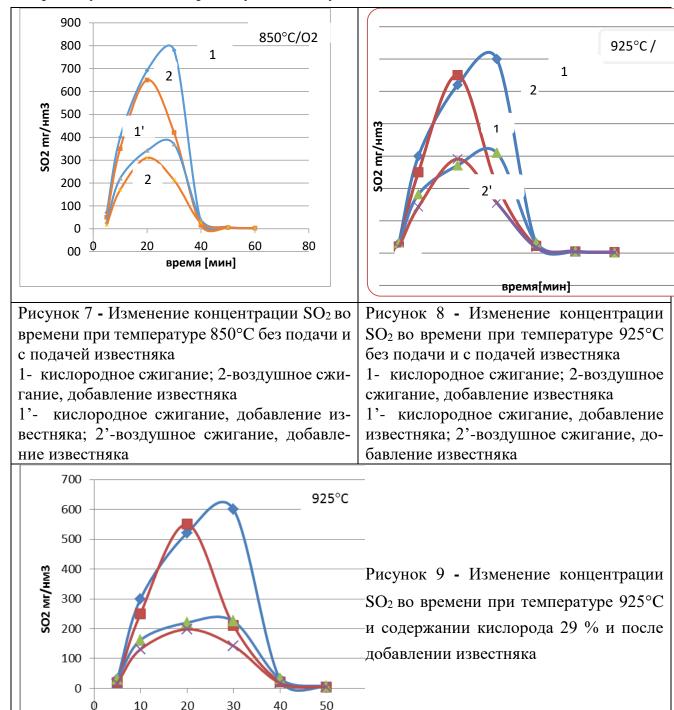
Рисунок 5 - Изменение концентрации SO₂ во времени при температуре 850°C 1- кислородное сжигание; 2-воздушное сжигание

Рисунок 6 - Изменение концентрации SO_2 во времени при температуре $850^{\circ}C$ 1- кислородное сжигание; 2-воздушное сжигание

Добавление известняка (с расходом около 0,40 г/с при мольном отношении Ca/S 2.7) значительно снижает концентрацию SO₂ при различных условиях. Так, выбросы SO₂ достигают почти 680 мг/нм³ при воздушном сжигании (содержание кислорода 21%) и 820 мг/нм³ при кислородном сжигании без подвода известняка (рис. 7). При тех же условиях добавление известняка ограничивает пиковую концентрацию SO₂ примерно до 300 мг/нм³ и 400 мг/нм³ соответственно. Известно, что связывание серы может быть менее эффективным при кислородном сжигании по сравнению с воздушным. Однако, увеличение температуры (рис. 8) повышает эффективность связывания при кислородном сжигании. При той же концентрации кислорода 21%, SO₂ снижается до 300 мг/нм³ в случае кислородного сжигания и до 250 мг/нм³ при воздушном.

На рис. 9 приведены результаты расчетов в условиях повышенной температуру слоя и концентрации кислорода 29 %. В таком режиме концентрация SO₂ уменьшается

до 220 мг/нм³. В этом случае подавление выбросов окислов серы осуществляется как по прямому, так и по непрямому механизму.



Мольное отношение Ca/S является определяющим параметром в процессе улавливания серы, поскольку оно напрямую связано с количеством известняка, подаваемого

Время [мин]

-100

в камеру сгорания. Увеличение отношения Ca/S приводит к росту эффективности улавливания серы, однако рост эффективности сильно замедляется при отношении Ca/S больше 2. Для гидродинамики важен также размер подаваемых частиц, чтобы избежать излишнего уноса при достаточной скорости циркуляции. Результаты исследования с размером частиц в диапазоне от 0,2 до 0,6 мм представлены на рисунке 10.

Основные уравнения модели для частиц известняка

Нестационарное уравнение сохранения массы (в слое продукта):

$$\frac{\partial C_{SO_2}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_{eff,SO_2} \frac{\partial C_{SO_2}}{\partial r} \right).$$

Граничные условия: на поверхности частицы и на плоской поверхности твердого тела

$$\frac{\partial C_{SO_2}}{\partial r} = K_s C_{SO_2}, \quad r = r_f. \quad D_{eff,SO_2} \frac{\partial C_{SO_2}}{\partial r} = h(C_{SO_2,s} - C_{SO_2,b}), \quad r = R.$$

Общий массовый баланс для твердых реагентов (CaO, CaCO₃)

$$\frac{dr_f}{dt} = -\frac{M}{\rho} K_s C_{SO_2,f}^a.$$

Предполагается, что эффективный коэффициент диффузии изменяется в зависимости от конверсии согласно модели случайных пор для реакций «жидкость – твердое вещество». Соответственно, диффузионные и транспортные эффекты:

$$\tau = 1/\epsilon, \tau_0 = 1/\epsilon_0. \ D_e = D_{e_0} \frac{\epsilon \tau_0}{\epsilon_0 \tau}. \ \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - (z-1) \frac{1-\epsilon_0}{\epsilon_0}, D_e = D_{e_0} \left[1 - (z-1) \frac{1-\epsilon_0}{\epsilon_0} X\right]^2.$$

Размер частиц и максимальная конверсия SO₂

$$R_{s} = \frac{\left(F_{0,\text{топіливо}} \cdot X_{s,\text{топіливо}} / M_{s}\right) - QC_{s}}{\left(F_{0,\text{топіливо}} \cdot X_{s,\text{топіливо}} / M_{s}\right)} \cdot 100, \% \ X_{s,\text{max}} = \frac{\epsilon_{0}}{1 - \epsilon_{0}} (1 - z), z = \text{CaSO}_{4} / \text{CaO}_{s}$$

Слишком мелкие частицы могут не улавливаться в циклоне и уноситься из топки. Максимальное время пребывания относится к частицам с размерами 0,2 - 0,3 мм и составляет не менее 4 ч.

В четвертой главе приведен анализ и дана оценка влияния таких факторов, как добавка биомассы, рециркуляция дымовых газов, температура, ступенчатый подвод кислорода, парциальное давление CO₂, добавка известняка, содержание ряда элементов в золе и размер частиц известняка.

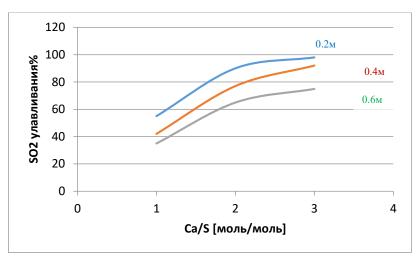


Рисунок 10 - Эффективность улавливания SO₂ при разных молярных отношения Ca/S для частиц известняка различных размеров

Расчетным путем исследовано влияние температуры, концентрация кислорода, рециркуляции дымовых газов, ступенчатого подвода кислорода, типа угля и доли биомассы. Выполнено сравнение результатов с расчетом при воздушном сжигании и лабораторными данными по кислородному сжиганию.

Влияние рециркуляции дымовых газов при кислородном сжигании с подачей рециркуляции в виде CO_2 после отделения влаги (сухая рециркуляция) заметно снижает выбросы NO_x . Полученные результаты хорошо соответствуют литературным данным. Рециркуляция CO_2 до отвода влаги из потока дымовых газов при кислородном сжигании («влажная» рециркуляция) еще недостаточно изучена.

Погрешности в расчете эмиссии NO_x с использованием программы ANSYS CHEMKIN-PRO объясняются ее высокой чувствительностью к погрешности вводимых данных.

Механизмы улавливания серы при воздушном и кислородном сжигании различаются. При воздушном сжигании углей эффективность сульфатирования обычно снижается из-за закупорки пор сорбента. Прямое сульфатирование может привести к более высокой степени улавливания серы по сравнению с процессом кальцинирования-сульфатирования. Отмечено, что CaSO₄ является предпочтительным конечным продуктом реакций и является термодинамически стабильным, хотя его стабильность уменьшается с ростом температуры. Процесс сульфатации обычно рассматривается как продолжаю-

щийся до значительной блокировки внешних пор, приводящей к образованию непроницаемой оболочки, которая оставляет значительное количество непрореагировавшего CaO.

Результаты расчетов подавления выбросов SO_2 в модели сульфатирования отдельных частиц известняка с программами MATLAB вполне совпадают с данными термогравиметрического анализа (TGA). Оптимальная температура для улавливания серы при кислородном сжигании в ЦКС составляет около 925-950 0 C.

Заключение

- 1. На основе анализа передовых достижений в области снижения вредных выбросов оксидов азота, закиси азота и окислов серы при сжигании твердых топлив в кипящем слое обоснована эффективность использования кислородного сжигания топлив с улавливанием CO₂
- 2. Выявлены особенности влияния газовых компонентов и параметров сжигания на образование и подавление вредных выбросов при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂, включая совместное сжигание углей и биомассы.
- 3. Выполнен выбор оптимальных методов расчета и математического моделирования процессов образование и подавление вредных выбросов. Для расчета использована модель горения в реакторе идеального перемешивания.
- 4. Расчетным путем исследовано влияние температуры, концентрации кислорода, рециркуляции дымовых газов, ступенчатого подвода кислорода, типа угля и доли биомассы на выбросы оксидов азота. Результаты расчетных исследований влияния режимных параметров на образование и подавление выбросов двуокиси и закиси азота, включая расчетные исследования совместного сжигания биомассы и угля показали, что:
- снижение выбросов NO_x за счет циркуляции дымовых газов при воздушном сжигании немного выше, чем при кислородном сжигании;
- совместное сжигание до 20 мас.% биомассы (древесной щепы) с углем дает меньше выбросов NO_x , чем раздельное;
- комбинация элементов, присутствующих в биомассе с кислородным сжиганием приводит к снижению доли NO_x по сравнению с воздушным сжиганием.
- 5. Предложена одномерная модель сжигания одиночных частиц топлив и сульфатирования частиц известняка, адекватно описывающая экспериментальные данные.

- 6. Результаты расчетных исследований влияния различных параметров на снижение выбросов оксидов серы, включая подачу известняка в топку с циркулирующим кипящим слоем показали, что:
- эффективность связывания серы растет с увеличением массового отношения Ca/S до 2,5;
- рециркуляция золы и известняка заметно повышает эффективность связывания серы.
- механизмы улавливания серы при воздушном и кислородном сжигании различаются. При воздушном сжигании углей эффективность сульфатирования обычно снижается из-за закупорки пор сорбента;
- косвенное сульфатирование дает лучшую конверсию по сравнению с прямым сульфатированием. Наилучшие результаты получены при t=925–950 °C при повышенной концентрации кислорода (29% об).
- 7. По результатам исследования даны рекомендации по оптимальным режимам сжигания с минимальными выбросами и дальнейшему развитию технологий кислородного сжигания в особенности для совместного сжигания угля и биомассы:
- соотношение 80% угля и 20% биомассы является близким к оптимальному в части выбросов оксидов азота;
- оптимальная температура для улавливания серы при кислородном сжигании в ЦКС составляет около 925-950 0 C;
- кислородное сжигание может играть важную роль в подавления всех видов выбросов, особенно улавливания CO₂. Концепция двойного сжигания, которая позволяет электростанции функционировать как с системой сепарации и удаления CO₂, так и без нее. представляется наиболее актуальной. Сочетание этой концепции и совместно сжигания угля и биомассы представляется очень перспективным.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

- **1.** Features of formation and suppression of sulfur oxide emissions during burning fuels in an oxygen medium with CO₂ recirculation_El-Sheikh K., Bukharkina T.V., Ryabov G.A. Power Technology and Engineering. 2020. T. 53. №5. C. 585-590. DOI: 10.1007/s10749-020-01120-2. IF 0.245 **SCOPUS**
- 2. The generation and suppression of NO_x and N_2O in the oxy-fuel combustion process with recycled CO_2 (an overwiew) emissions Khalid El Sheikh, Bukharkina T.V., Ryabov G.A., Hamid M.D., Hussain M.A. Thermal Engineering. 2020. T. 67. N_2 1. DOI: 10.1134/S0040601519120048. IF 0.456 **SCOPUS**
- 3. Advances in reduction of NO_x and N₂O emission formation in an oxy-fired fluidized

bed boiler. El Sheikh K., Bukharkina T.V., Khan M.J.H., Diana Hamid M., Ali B.S., Hussain M.A., Shrestha S., Ryabov G.A., Dolgushin L.A., Gorelova E.A. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2019. T. 27. № 2. C. 426-443. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.06.033 IF 0.572 **SCO-PUS**

- 4. Hydrodynamic characteristics in cold modrl of dual fluidized bed gasifiers. Siddhartha Shrestha, Brahim Si Ali , Badrul Mohamed Jan, Mahar Diana Binti Hamid, Khalid El Sheikh // Powder Technology 286 (2015) 246–256 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia April 2016 Chemical Engineering Research and Design 109 Project: Oxycombustion using dual fluidized bed DOI: 10.1016/j.cherd.2016.04.002 IF 0,998 **SCOPUS**
- **5.** Образование и подавление выбросов NO_X и N₂O при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂ (обзор). Халид Эль-Шейх, Рябов Г.А., Хамид М.Д., Бухаркина Т.В., Хусейн М.А. Теплоэнергетика. 2020. № 1. С. 5-14. DOI: 10.1134/S004036361912004X IF 1.148 **BAK**
- 6. Особенности образования и подавления выбросов оксидов серы при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией СО₂. Халид Э.Ш., Рябов Г.А., Бухаркина Т.В. Электрические станции. 2019. № 8 (1057). С. 18-24. IF 0.370 **ВАК**
- 7. Численное моделирование вредных выбросов NO_X при сжигании угля и биомассы в разных условиях. Халид Эль-Шейх, Рябов Г.А., Бухаркина Т.В., Сучков С.И. Энергетик. 2019. № 12. С. 45-47. IF 0.242 **BAK**
- 8. Особенности образования и подавления выбросов оксидов азота и серы при кислородном сжигании твердых топлив в кипящем слое. // 4-ая Международная научнотехническая Конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла». Москва. 02 03 октября 2018 г.
- 9. Эль-шейх Х.Х. Влияние температуры и доли рисовой шелухи в смеси с углем на образование золы при совместном сжигании. [Текст] / Х.Х. Эль-шейх, // Международная научно-техническая конференция. ВТИ Москва 2016. С. 190—200.
- 10. Эль-шейх Х.Х. Особенности образования и подавления выбросов оксидов азота при кислородом сжигании твердых топлив в кипящем слое. [Текст] / Х.Х. Эль-шейх, Г.А. Рябов, Т. В. Бухаркина // Международная научно-техническая конференция. ВТИ Москва 2019. С. 142—148.