

На правах рукописи



Мустафин Равиль Мансурович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
ЗА СЧЕТ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Промышленная теплоэнергетика».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Пашенко Дмитрий Иванович

Официальные
оппоненты: **Попов Станислав Константинович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационных технологий наукоемких отраслей» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Меренцов Николай Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Защита состоится «22» мая 2025 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борисова Светлана Дмитриевна

Общая характеристика диссертации

Актуальность. Задача повышения энергетической эффективности теплоэнергетических и теплотехнических установок является одной из основных, стоящих перед инженерами и учеными всех стран. Несмотря на успехи последних лет в развитии возобновляемых источников энергии, их доля в общем энергетическом балансе не превышает нескольких процентов. Основным источником первичной энергии остается и, в ближайшие десятилетия будет оставаться, углеводородное сырье. Энергетика тепловых технологий является одной из ключевых отраслей отечественной промышленности, на долю которой приходится до 30% потребления природного газа. Отличительной особенностью высокотемпературных теплотехнологических установок (ВТУ) является их сравнительно низкая эффективность, в основном обусловленная высокой температурой отходящих дымовых газов. В разные годы вопросами повышения энергетической эффективности таких установок занимались выдающиеся отечественные ученые: А.Д. Ключников, Н.А. Семенов, О.Л. Данилов и др.

Среди различных способов повышения энергетической эффективности высокотемпературных теплотехнологических установок можно выделить термохимическую рекуперацию (ТХР) тепла отходящих дымовых газов, позволяющий достигать высокой степени рекуперации, при умеренной температуре компонентов горения. Первым примером опытно-промышленного внедрения термохимической рекуперации тепла за счет паровой конверсии метана является система рекуперации стекловаренной печи «Гусевского стекольного завода», реализованная группой ученых Московского энергетического института (МЭИ) под руководством И.И. Перелетова. Положительные результаты показали перспективность этого способа повышения энергетической эффективности. Однако, одной из главных особенностей ТХР за счет паровой конверсии метана является необходимость

использования безвозвратно теряемого водяного пара, а связанные с этим затраты теплоты на его производство составляют до 20% от общего теплового баланса системы рекуперации. В свою очередь, решение задачи снижения затрат теплоты на генерацию пара приведет к повышению энергетической эффективности систем ТХР за счет паровой конверсии метана.

В настоящей диссертации предлагается и исследуется техническое решение повышения энергетической эффективности термохимической рекуперации тепла за счет паровой конверсии метана. В основу этого решения положена глубокая рекуперация тепла дымовых газов, которая позволяет не только использовать скрытую теплоту конденсации водяных паров, но и получать ранее безвозвратно теряемую воду, которая может использоваться для паровой конверсии метана.

Целью работы является разработка и исследование схемы глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана на примере использования в составе высокотемпературной теплотехнологической установки.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

- разработка новой схемы глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана;
- термодинамический анализ методом минимизации свободной энергии Гиббса разработанной схемы и определение влияния технологических параметров на ее энергоэффективность;
- разработка численной модели процессов тепло- и массообмена в термохимическом рекуператоре;
- разработка пользовательской функции, описывающей химическую кинетику реакций паровой конверсии метана по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда;

- определение энергетической эффективности и экономической целесообразности использования предлагаемого решения на примере схемы ТХР тепла отходящих дымовых газов высокотемпературной теплотехнологической установки.

Методы исследования. В работе использованы методы термодинамического анализа энергетических установок, численного моделирования процессов, протекающих в разрабатываемой схеме и технико-экономического анализа в сочетании с применением современных программных комплексов.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника»:

1. Термодинамические процессы и циклы применительно к установкам производства, преобразования и потребления энергии;
2. Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси;
3. Оптимизация схем теплоэнергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, в том числе, основанных на принципах их комбинированного производства. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и систем теплопотребления с целью повышения их энергоэффективности.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель химической кинетики реакций паровой конверсии метана по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда;
2. Разработана численная модель процессов тепломассообмена, протекающих в реакционном пространстве термохимического рекуператора. При моделировании паровой конверсии метана впервые использовано хаотичное заполнение реакционного пространства частицами катализатора ($\text{Ni-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$),

вместо гомогенизированной среды, что согласуется с реальными процессами, протекающими в термохимическом реакторе;

3. Впервые проведено сравнение действительного процесса паровой конверсии метана с равновесным решением. Определена зависимость отношения степени конверсии метана, полученной при CFD-моделировании, к степени конверсии метана, полученной при равновесном решении, от температуры дымовых газов, для различных соотношения пара к метану.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием современных теоретических и экспериментальных данных, высокоточных методов компьютерного моделирования, а также хорошей сходимостью численных исследований термодинамики процесса, проведенных в работе, с данными экспериментов и расчетов, полученными другими исследователями.

Практическая значимость работы:

1. Предложена новая схема глубокой термохимической рекуперации теплоты отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана;

2. Определено влияние технологических параметров на эффективность использования термохимической рекуперации теплоты за счет паровой конверсии метана;

3. Выполнена оценка энергетической эффективности и экономической целесообразности использования предлагаемого решения на примере схемы термохимической рекуперации теплоты отходящих дымовых газов нагревательной печи.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологическая схема глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана;

2. Термодинамическая модель системы глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана;

3. Результаты термодинамического анализа системы глубокой термохимической рекуперации за счет паровой конверсии метана в составе высокотемпературной теплотехнологической установки;

4. Численная модель реактора паровой конверсии метана, хаотично заполненного пористыми частицами катализатора ($\text{Ni-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$);

5. Результаты численного исследования процессов тепломассообмена, протекающих в реакторе паровой конверсии метана и сравнения действительного процесса паровой конверсии метана с равновесным решением;

6. Результаты расчета экономической эффективности использования глубокой термохимической рекуперации тепла в составе высокотемпературной теплотехнологической установки.

Внедрение результатов работы.

1. Разработанные пользовательские функции для решения химических задач в программном комплексе Ansys Fluent прошли государственную регистрацию, получены свидетельства для ЭВМ;

2. Результаты работы внедрены в расчетную практику крупного промышленного предприятия ООО «ТСК Волгаэнергопром», что подтверждается актом о внедрении;

3. Результаты используются в учебном процессе кафедры «Промышленная теплоэнергетика» в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в рамках курсов «Высокотемпературные процессы и установки», «Специальные вопросы компьютерного моделирования объектов теплоэнергетики»;

4. Результаты работы использованы при проведении исследований в рамках гранта РФФИ 19-19-00327 «Разработка и оптимизация технологии термохимической регенерации теплоты продуктов сгорания органического топлива: экспериментальное и численное исследование», отобранного в рамках конкурса на «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых

научных исследований отдельными научными группами» (руководитель – Пащенко Д.И.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, в обосновании методов решения поставленных задач. В разработке численных моделей с использованием современных программных комплексов и пользовательских функций для них, а также в непосредственном выполнении основной части расчетной работы, интерпретации результатов и формулировке выводов.

Апробация работы диссертационного исследования.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях: XVII Международной научно-технической конференции «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов», г. Саратов, 2024; Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, 2024; XXXII-й Международной научной конференции «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-32», г. Санкт-Петербург, 2019; 26-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, г. Москва, 2020; II-й международной научно-технической конференции «SMART ENERGY SYSTEMS 2021», г. Казань, 2021 и научных семинарах кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Самарского государственного технического университета.

Публикации.

Основные положения и результаты работы изложены в 15 печатных изданиях, в том числе 2 в журналах из перечня ВАК и 8 в международных изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus. Также получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 132

страницы, включая 40 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 147 наименований.

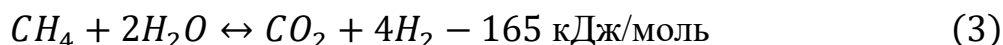
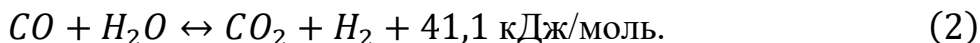
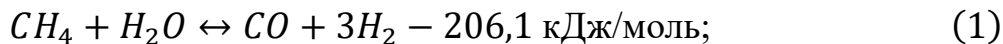
Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель, сформулирована научная новизна, а также представлены положения, которые выносятся на защиту, показана практическая ценность полученных результатов и разработанных методов, приведена структура диссертации, сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе проведен анализ современного состояния использования углеводородного топлива в теплоэнергетике и теплотехнологии, а также проведен обзор патентно-информационных источников по теме исследования. Показано, что, несмотря на успехи, достигнутые в использовании возобновляемых источников энергии, их доля в общем топливно-энергетическом балансе промышленно развитых стран, таких как Китай, Россия, Индия и др. не превышает нескольких процентов. В этой связи, прогнозные оценки специалистов показывают, что глобальная энергетическая ситуация значительно не изменится в ближайшие десятилетия, поскольку мир все еще будет зависеть от ископаемых видов топлива.

В современной теплоэнергетике и теплотехнике можно выделить два основных направления развития: повышение энергетической эффективности топливопотребляющих установок и использование низкоуглеродных видов топлива. Одним из перспективных способов повышения энергетической эффективности, удовлетворяющий двум указанным выше направлениями, является термохимическая рекуперация тепла. Сущность термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов заключается в их использовании для предварительной эндотермической трансформации исходного топлива. В результате такой трансформации, тепло отходящих дымовых газов трансформируется в химическую энергию нового топлива (продуктов термохимической трансформации).

Наибольшее распространение для полезного использования высокотемпературных отходящих дымовых газов получила термохимическая рекуперация за счет паровой конверсии метана, описываемая следующими уравнениями:



Условно, процесс трансформации химической энергии топлива в теплоту в этом случае можно разделить на две стадии. На первой стадии происходит термохимическая трансформация исходного топлива, в результате которой продукты трансформации получают дополнительную химически связанную теплоту, в виде возросшей теплоты сгорания (в пересчете на условную единицу исходного топлива), а на второй стадии происходит сжигание нового синтетического топлива.

Пионерами в опытно-промышленном использовании термохимической рекуперации (ТХР) тепла за счет паровой конверсии метана являются специалисты МЭИ под руководством И.И. Перелетова. Система ТХР была использована с целью повышения энергетической эффективности стекловаренной печи, для которой характерна высокая температура отходящих дымовых газов. Испытания показали, что в стекловаренной печи с ТХР удельный расход топлива на 1 кг шихты снизился с 0,74 до 0,524 м³, т.е. на 29,2%, или в 1,41 раза по сравнению с расходом природного газа для стекловаренной печи без ТХР. Опытные-промышленные испытания также показали, что удельный расход топлива на 1 кг стекловолокна снизился с 1,34 до 0,994 м³, т.е. на 25,8%, или в 1,35 раза.

Кроме того, в первой главе показано и проанализировано большинство известных примеров промышленного и опытно-промышленного использования термохимической рекуперации тепла за счет паровой конверсии метана для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок.

Показаны основные преимущества использования такого способа повышения энергетической эффективности.

Однако, для термохимической рекуперации тепла за счет паровой конверсии метана характерны некоторые недостатки, снижающие энергетическую эффективность ее использования. Одним из них является необходимость производства водяного пара для протекания реакций паровой конверсии метана. Показано, что расход теплоты на производство водяного пара для паровой конверсии метана может достигать 20% от теплового баланса системы ТХР. Кроме того, водяной пар после сжигания в камере сгорания безвозвратно теряется с уходящими дымовыми газами.

Для устранения недостатка, связанного с необходимостью производства водяного пара и его безвозвратной потери с уходящими газами, предложена новая схема глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана.

Вторая глава посвящена термодинамическому анализу предлагаемой схемы глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана, на примере использования в составе высокотемпературной теплотехнологической установки (ВТУ). Отличительной особенностью использования ТХР за счет паровой конверсии метана является увеличенная мольная доля водяных паров в продуктах сгорания. Так, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,0$, в случае использования в качестве топлива продуктов паровой конверсии метана, полученных при соотношении окислителя к исходному топливу $\beta = \text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4 = 1:1$ и $\beta = \text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4 = 2:1$, мольная доля водяных паров в дымовых газах составляет 0,26 и 0,32, соответственно. В этой связи становится рациональным использовать конденсацию водяных паров из дымовых газов, в результате которой, во-первых, появляется возможность использовать скрытую теплоту конденсации, во-вторых, сконденсированный водяной пар может быть повторно использован для генерации водяного пара для паровой конверсии метана.

Термодинамический анализ системы ТХР позволяет определить эффект технологических параметров на тепловой и материальный баланс. Для термодинамического анализа процесса паровой конверсии метана использован метод минимизации свободной энергии Гиббса, который основан на том, что система находится в термодинамически выгодном состоянии, когда ее полная свободная энергия Гиббса находится на минимальном значении, и ее дифференциал равен нулю при заданной температуре и давлении:

$$dG^t = 0, \quad (4)$$

где G^t – свободная энергия Гиббса, кДж.

Термодинамический анализ выполнен, используя систему точного моделирования технологических процессов Aspen HYSYS, являющуюся приложением для моделирования стационарных и нестационарных химико-технологических систем. Реактор Гиббса использован для расчета состава продуктов конверсии в соответствии с протекающими химическими реакциями, информация о которых содержится в базе данных Aspen HYSYS.

Расчетная схема высокотемпературной теплотехнологической установки с термохимической рекуперацией тепла за счет паровой конверсии метана показана на рисунке 1.

В работе проводился термодинамический анализ схемы ТХР за счет паровой конверсии метана с глубокой утилизацией. Выявлено, что степень конверсии метана увеличивается с ростом температуры, подводимой к реакционному пространству. Также увеличение соотношения $\beta = \frac{H_2O}{CH_4}$ приводит к более интенсивной конверсии. Помимо увеличения конверсии соотношение β уменьшает степень отложения углерода на катализаторах, что описано во многих исследованиях.

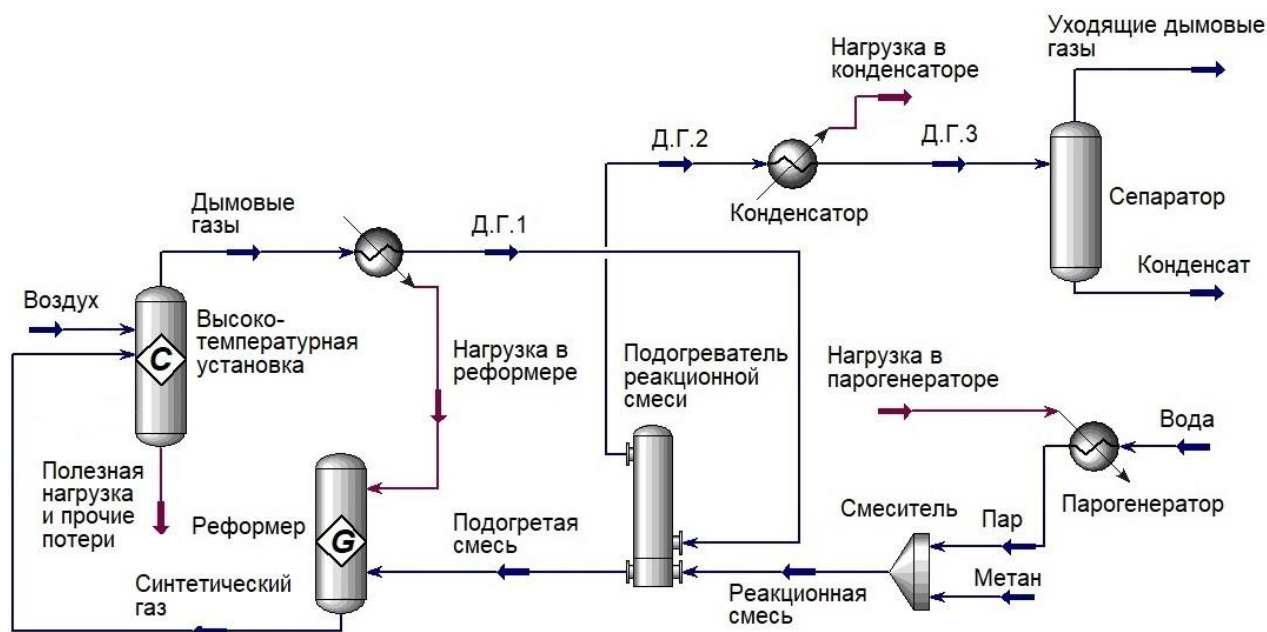


Рис. 1. Расчетная схема для термодинамического анализа системы ТХР за счет паровой конверсии метана.

Также проанализировано влияние давления в реакторе реформинга метана на степень конверсии. При увеличении давления степень конверсии уменьшается, что согласовывается с другими исследованиями. Однако повышенное давление исходных компонентов реакции необходимо для стабильной работы системы и интенсификации теплообмена внутри реактора паровой конверсии метана.

Для определения полезного эффекта от внедрения разрабатываемой технологии проведен расчет степени рекуперации тепла дымовых газов и коэффициента полезного использования тепла топлива (КПИТТ).

Степень рекуперации рассчитывалась по следующей формуле:

$$\eta = \frac{Q_{\text{рек}}}{Q_{\text{общ}}}, \quad (5)$$

где η – коэффициент рекуперации, $Q_{\text{рек}}$ – рекуперированная теплота, которая возвращается в цикл, кВт; $Q_{\text{общ}}$ – полная теплота, которая содержится в дымовых газах, кВт.

Коэффициент полезного использования тепла топлива рассчитывался по следующей формуле:

$$\eta_{\tau} = \frac{Q_{\text{рек}}}{B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (6)$$

где η_{τ} – коэффициент полезного использования тепла топлива; $Q_{\text{рек}}$ – рекуперированная теплота, которая возвращается в цикл, кВт; B – расход топлива, кг/ч; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

На рисунке 2 показана степень рекуперации тепла дымовых газов за счет паровой конверсии метана для двух схем: а) с конденсацией водяных паров из дымовых газов; б) без конденсации.

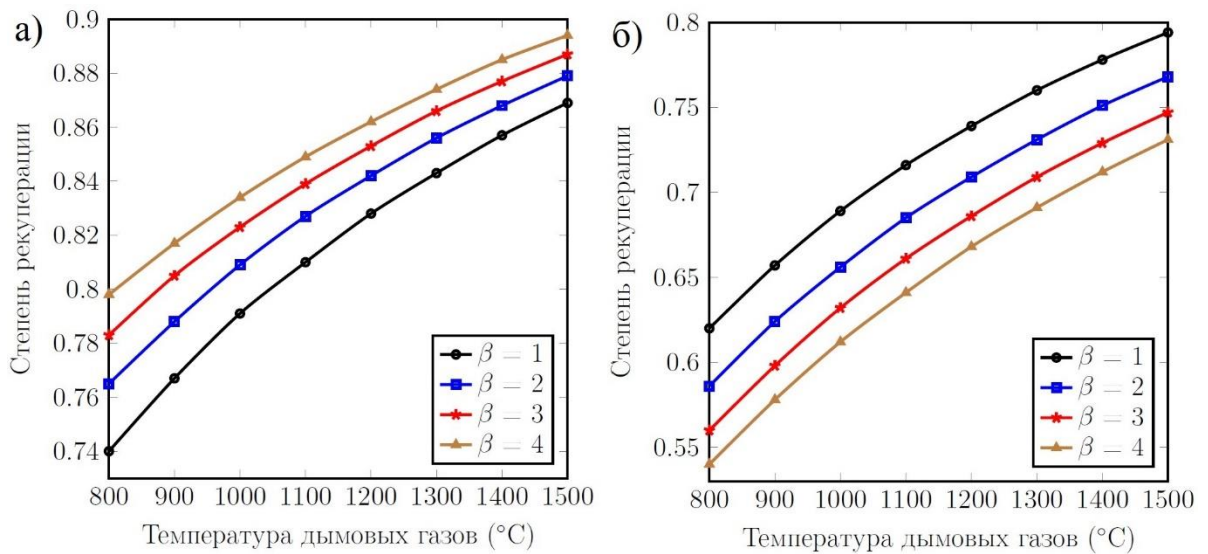


Рис. 2. Зависимость степени рекуперации тепла от температуры дымовых газов для различных β : а) Схема с конденсацией водяных паров из дымовых газов; б) Схема без конденсации.

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента полезного использования тепла топлива (КПИТТ) от температуры дымовых газов для двух схем, различных β , с учетом прироста. Здесь сплошными линиями показаны зависимости для схемы с глубокой утилизацией, а пунктирными линиями показаны зависимости для схемы без глубокой утилизации.

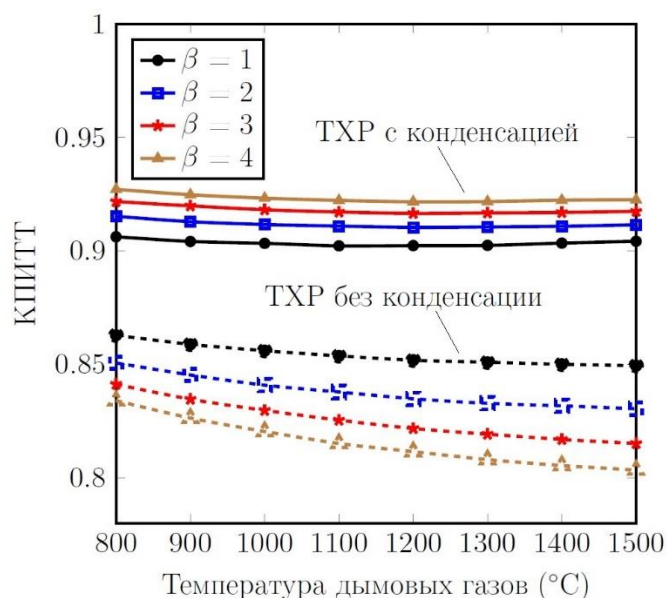


Рис. 3. Зависимость коэффициента полезного использования тепла топлива (КПИТТ) от температуры дымовых газов для двух схем, различных β , с учетом прироста.

Видно, что конденсация водяных паров увеличивает степень рекуперации тепла дымовых газов и прирост коэффициента полезного использования тепла топлива. При этом увеличение соотношения β в схеме с конденсацией увеличивает степень рекуперации тепла и КПИТТ, а в схеме без конденсации уменьшает.

В третьей главе проводилось CFD-моделирование процессов тепломассообмена, протекающих в реакторе паровой конверсии метана, представляющий собой набор реакционных элементов, заполненных частицами никельсодержащего катализатора. CFD-моделирование выполнено для одного реакционного элемента, т.к. принято допущение, что процессы тепломассообмена во всех реакционных элементах протекают одинаково.

Расчетная геометрия реакционного элемента, заполненного частицами пористого катализатора, показана на рисунке 4.

После построения геометрии, расчетная область проходит через дискретизацию и задание граничных условий. Расчетная сетка и ее структура также показана на рисунке 4. Число элементов расчетной сетки было определено

на основе анализа сеточной сходимости. В качестве контрольного параметра была выбрана температура реакционной смеси. Общее число элементов составляет 13 млн. ячеек.

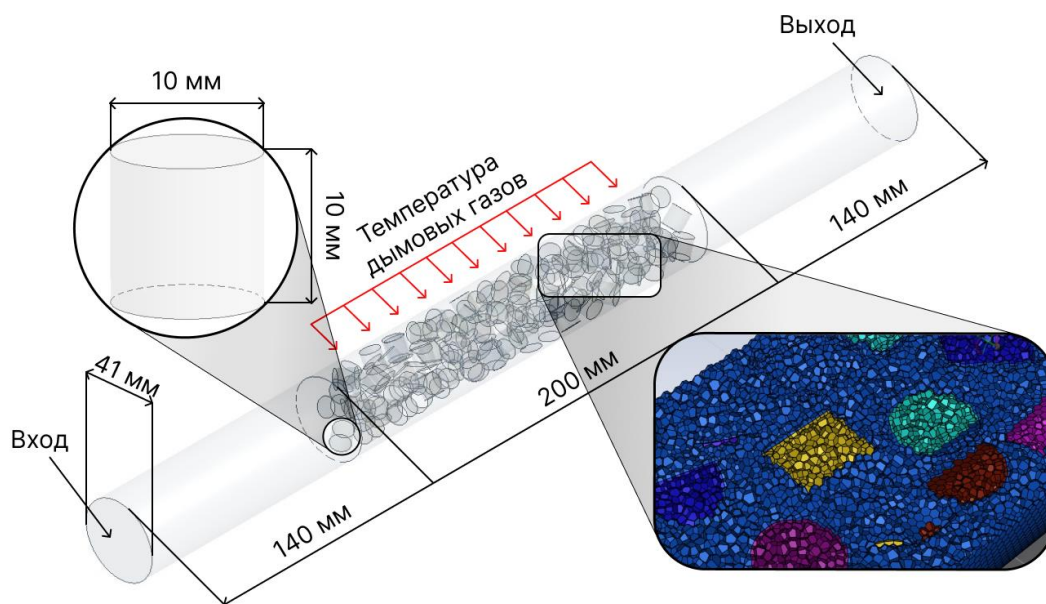


Рис. 4. Расчетная геометрия реакционного элемента, заполненного частицами катализатора и расчетная сетка.

В модуль Fluent встраивалась, разработанная пользовательская функция, описывающая химическую кинетику реакции паровой конверсии метана по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда, на языке программирования C++. С исходным кодом можно ознакомиться в приложениях текста диссертации.

В результате CFD-моделирования были получены контуры температур и конверсии метана, представленные на рисунке 5. На рисунке 5 а) показан контур температур в реакционном пространстве и на стенках катализаторов. Видно, что поток реакционной смеси прогревается равномерно по течению. Наиболее нагретая область наблюдается на стенках реформера, т.к. там задавалась температура дымовых газов.

На рисунке 5 б), в) показаны контуры мольного расхода метана и водорода. Наибольшее количество водорода наблюдается на последних катализаторах и выходе из трубы, что согласуется с реальным протеканием паровой конверсии метана. На рисунке приведен случай с температурой дымовых газов равной

900°C. Видно, что при такой температуре степень конверсии метана составляет 31%.

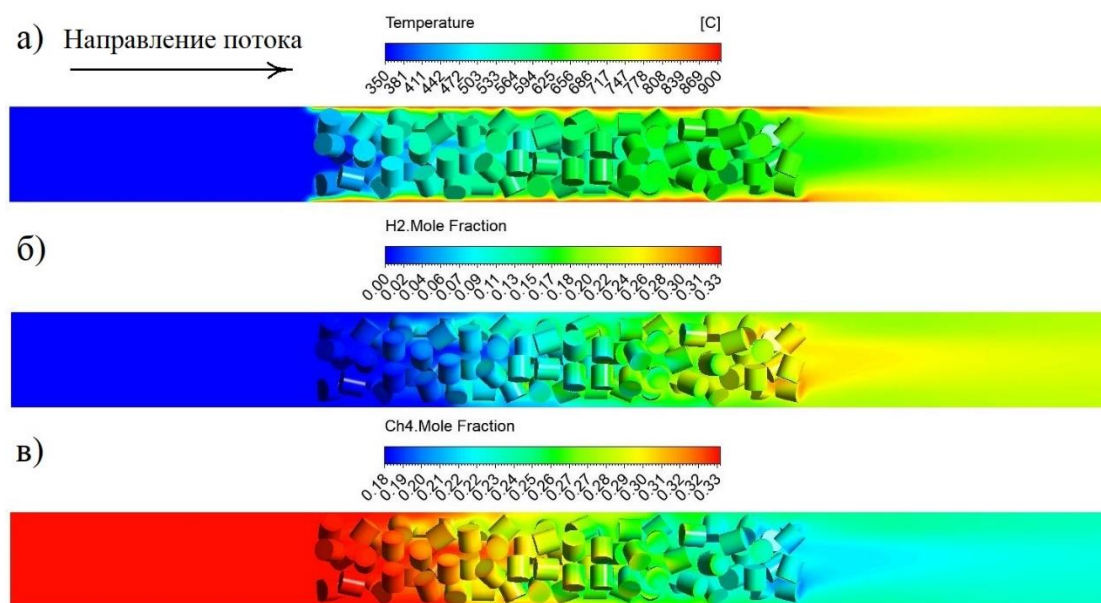


Рис. 5. а) Контур температур; б) Контур мольного содержания водорода; в) Контур мольного содержания метана.

CFD-модель использовалась для определения параметров системы термохимической рекуперации. На рисунке 6 а) показана зависимость конверсии метана от времени контакта для различных температур дымовых газов, которые омывают реформер, при $\beta = 2$. Видно, что увеличение температуры дымовых газов приводит к повышению степени конверсии метана и зависимость начинает принимать логарифмическую форму. Это происходит из-за того, что при высоких температурах дымовых газов конверсия метана достигает своего равновесного значения, при времени контакта – $\zeta = 200 - 250 (\text{кг}_{\text{кат}} \cdot \text{с} / \text{моль}_{\text{CH}_4})$, а при низких температурах конверсия метана далека от своего равновесного значения.

Проводилось сравнение конверсии метана, получаемой при CFD-моделировании, с равновесными результатами. На рисунке 6 б) показана зависимость отношения степени конверсии метана, полученной при CFD-моделировании, к степени конверсии метана, полученной при равновесном решении, от температуры дымовых газов, для различных β . Увеличение

температуры дымовых газов, а также увеличение соотношения пара к метану – β приводит к приближению действительного процесса к равновесному. Однако увеличение β дает наибольший прирост при высоких температурах дымовых газов, при низких температурах увеличение β не оказывает существенного влияния.

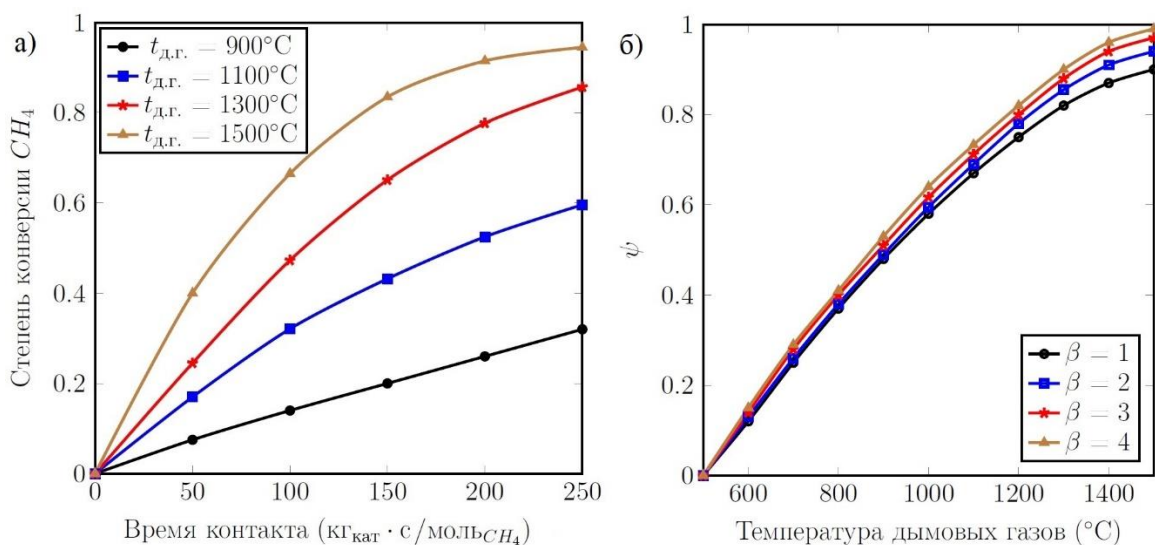


Рис. 6. Степень конверсии метана как функция времени контакта: а) Для различных температур дымовых газов, при $\beta = 2$; б) Зависимость ψ от температуры дымовых газов для различных β . Где ψ - отношение степени конверсии метана, полученной при CFD-моделировании, к степени конверсии метана, полученной при равновесном решении.

На основе полученных результатов можно подобрать реактор паровой конверсии метана с необходимыми количеством реакционных труб и массой катализаторов $\text{Ni-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ для конкретной высокотемпературной установки.

В четвертой главе приведено технико-экономическое обоснование разрабатываемой технологии. Проводились расчеты годовых затрат для трех схем: 1 – без рекуперации тепла дымовых газов; 2 – ТХР без глубокой утилизации; 3 – ТХР с глубокой утилизацией. Выявлено, что наиболее экономичной схемой является ТХР с глубокой утилизацией и ежегодные затраты при использовании такой схемы будут ниже на 44% по сравнению с первой схемой.

На основе термодинамического анализа в Aspen Hysys подбиралось необходимое оборудование. Исходя из CFD анализа подбирался тип реформера и необходимое количество катализатора. После чего проводился расчет окупаемости проекта. Все расчеты были выполнены для нагревательной печи с расходом топлива 68 кг у. т./т и температурой дымовых газов 1200°C.

На рисунке 7 а) представлено сравнение расхода топлива для трех схем при одинаковой нагрузке методической печи.

Выявлено, что наибольшая экономия топлива наблюдается на третьей схеме. По сравнению с первой схемой третья схема потребляет на 51,5% меньше топлива и на 18% меньше по сравнению со схемой ТХР без глубокой утилизации. Это позволяет говорить о целесообразности модернизации стандартной схемы работы методической печи, с помощью применения ТХР тепла дымовых газов с глубокой утилизацией.

На рисунке 7 б) показан срок окупаемости проекта для двух схем при различных соотношениях β .

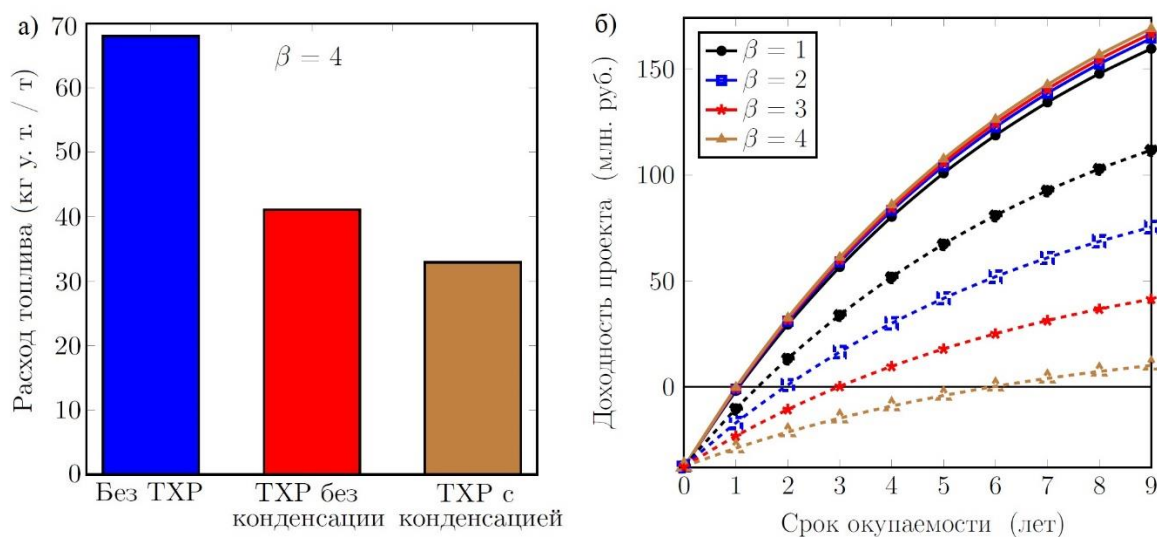


Рис. 7. а) Диаграмма расхода топлива для трех схем: 1 – без рекуперации тепла дымовых газов; 2 – ТХР без глубокой утилизации; 3 – ТХР с глубокой утилизацией; б) График, показывающий срок окупаемости проекта для двух схем, ТХР без глубокой утилизации и ТХР с глубокой утилизацией, при различных β .

Здесь сплошными линиями показаны сроки окупаемости для схемы с глубокой утилизацией тепла дымовых газов, а пунктирными линиями без глубокой утилизации.

Экономическая выгода рассчитывалась исходя из экономии на ежегодных затратах. Также предполагалось, что тепловая энергия для генерации пара в схеме ТХР без конденсации получается путем сжигания метана. Расчет показал, что схема с глубокой утилизацией окупается быстрее, чем схема без глубокой утилизации. Также соотношение β не оказывает заметного влияния на схему с глубокой утилизацией, однако для схемы без глубокой утилизации чем выше β , тем дольше окупается проект.

В приложениях приведены акты внедрения, свидетельства регистрации программы для ЭВМ и исходный код пользовательской функции для CFD-моделирования.

Основные выводы и результаты работы.

1. Разработана схема термохимической рекуперации (ТХР) тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана с конденсацией водяных паров из дымовых газов. Проведен термодинамический анализ, разработанной схемы. Выявлено, что степень рекуперации при использовании схемы с конденсацией водяных паров из дымовых газов выше и составляет до 87% против 78% при использовании схемы без конденсации. Также определено, что эффективность использования тепла топлива в схеме с конденсацией водяных паров из дымовых газов выше на 4-9% по сравнению со схемой без конденсации.

2. Разработана математическая модель, описывающая химическую кинетику реакций паровой конверсии метана по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда.

3. Разработана численная модель процессов тепло- и массообмена в термохимическом рекуператоре, с учетом дискретности каталитической насадки и проведено их исследование. Установлено, что наиболее эффективно процесс конверсии метана в реформере протекает при времени контакта – $\zeta = 250(\text{кг}_{\text{кат}} \cdot \text{с} / \text{моль}_{\text{CH}_4})$ и соотношении пара к метану – $\beta = 4$.

4. Проведено сравнение конверсии метана, получаемой при CFD-моделировании, с равновесными результатами. Увеличение температуры дымовых газов, а также увеличение соотношения пара к метану – β приводит к приближению действительного процесса к равновесному. Однако увеличение β дает наибольший прирост при высоких температурах дымовых газов, при низких температурах увеличение β не оказывает существенного влияния.

5. Рассчитаны энергетические и экономические показатели для трех схем: 1 – без рекуперации тепла отходящих газов; 2 – ТХР без конденсации водяных паров из дымовых газов; 3 – ТХР с конденсацией водяных паров из дымовых газов. Определено, что третья схема потребляет на 51,5% меньше топлива по сравнению с первой схемой и на 18% меньше, по сравнению со второй. Выявлено, что первая схема является наиболее выгодной и ежегодные затраты при ее использовании будут ниже на 44%, по сравнению с первой схемой. Расчет окупаемости показал, что разрабатываемый проект окупается за 1 год.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. Брагин, Д.М., **Мустафин Р.М.**, Попов, А.И., Зинина, С.А., Еремин, А.В. Исследование аэродинамических процессов в пористых материалах на основе трижды периодических минимальных поверхностей //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – №. 5. – С. 66-78.

2. Пащенко Д.И., **Мустафин Р.М.** Использование термохимических принципов преобразования энергии для аккумулирования теплоты отходящих дымовых газов теплотехнологических установок. // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 26-31.

В рецензируемых журналах, состоящих в системе Scopus:

3. **Mustafin R.M.**, Karpilov I.D. Effect of the Catalyst Shapes and the Packed Bed Structure on the Efficiency of Steam Methane Reforming. // Journal of Advanced

Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 104, № 1. – P. 124-140.

4. Karpilov I.D., **Mustafin R.M.** Steam Methane Reforming in a Swirling Flow: Effect of Reformer Design Parameters // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 104, № 1. – P. 93-105.

5. Pashchenko D.I., **Mustafin R.M.**, Karpilov I.D. Thermochemical recuperation by steam methane reforming as an efficient alternative to steam injection in the gas turbines // Energy. – 2022. – Vol. 258. – P. 124913.

6. Pashchenko D.I., **Mustafin R.M.**, Karpilov I.D. Efficiency of chemically recuperated gas turbine fired with methane: Effect of operating parameters // Appl. Therm. Eng. – 2022. – Vol. 212. – P. 118578.

7. Pashchenko D.I., **Mustafin R.M.**, Mustafina A.D. Steam methane reforming in a microchannel reformer: Experiment, CFD-modelling and numerical study // Energy. – 2021. – Vol. 237. – P. 121624.

8. Pashchenko D.I., Karpilov I.D., **Mustafin R.M.** Numerical calculation with experimental validation of pressure drop in a fixed-bed reactor filled with the porous elements // AIChE J. – 2020. – Vol. 66, № 5. – P. e16937.

9. Pashchenko D.I., **Mustafin R.M.** Ammonia decomposition in the thermochemical waste-heat recuperation systems: A view from low and high heating value // Energy Convers. Manage. – 2022. – Vol. 251. – P. 114959.

10. Pashchenko D.I., **Mustafin R.M.**, Karpilov I.D. Ammonia-fired chemically recuperated gas turbine: Thermodynamic analysis of cycle and recuperation system // Energy. – 2022. – Vol. 252. – P. 124081.

Основные работы в других изданиях:

11. **Мустафин Р.М.**, Карпилов И.Д. Термохимическое аккумулирование тепловой энергии отходящих дымовых газов // XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых): материалы международной молодежной научной конференции. – 2017. – С. 890-893.

12. Численное исследование кинетики реакции паровой конверсии метана в зависимости от количества катализатора / Карпилов, И.Д., **Мустафин Р.М.**, Москвитина, А.Д., Пащенко, Д.И. // Математические методы в технике и технологиях: материалы Международной научной конференции. – 2019. – С. 42-46.

13. Численное моделирование массообменных процессов конденсатора в системе термохимической регенерации теплоты / **Мустафин Р.М.**, Карпилов, И.Д., Гнутикова, М.И., Москвитина, А.Д. // Энерго-и ресурсосбережение-XXI век: материалы 17-й Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 146-148.

14. Численное исследование аэродинамики потока жидкости через каталитическую вставку термохимического регенератора / Карпилов, И.Д., Гнутикова, М.И., Москвитина, А.Д., **Мустафин Р.М.** // Энерго-и ресурсосбережение-XXI век: материалы 17-й Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 142-146.

15. Карпилов И.Д., **Мустафин Р.М.**, Москвитина А.Д. Применение конденсатора в системе термохимической регенерации // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы 26-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – 2020. – С. 688.

Список программ для ЭВМ, зарегистрированных в Роспатенте:

16. Карпилов И.Д., **Мустафин Р.М.**, Попов А.И., Брагин Д.М., Зинина С.А., Пащенко Д.И. Определение постоянной скорости трех основных реакций паровой конверсии метана на основе экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023682897 от 08.11.2023г.

17. Папков В.Д., Шадымов Н.А., Карпилов И.Д., **Мустафин Р.М.**, Пащенко Д.И. Определение скорости реакции паровой конверсии метанола на основе экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662780 от 28.06.2023г.

18. Шадымов Н.А., Папков В.Д., Карпилов И.Д., **Мустафин Р.М.**, Пащенко Д.И. Определение скорости реакции термического разложения аммиака на основе экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661520 от 16.06.2023г.

19. Попов А.И., Брагин Д.М., Еремин А.В., Зинина С.А., Олатуйи О.Д., **Мустафин Р.М.**, Карпилов И.Д. Определение коэффициента эффективной теплопроводности пористых материалов с упорядоченной структурой на основе экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615531 от 04.04.2023г.

Подписано в печать 20.03.2025 Формат 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. __. Тираж 100. Заказ № ____/ __.

Отпечатано в типографии Самарского государственного
технического университета 443100, Самара,
ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.