

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.»
(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**

ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054

Телефоны: (8452) 99-88-11;

факс (8452) 99-88-10;

(8452) 99-86-03; факс (8452) 99-86-04

E-mail: sstu_office@sstu.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Д.х.н., профессор

И.Г. Остроумов

«24» апреля 2025 г.



24.04.2025 № 04/53-1599

На № _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Мустафина Равиля Мансуровича

на тему: «Повышение энергетической эффективности термохимической
рекуперации теплоты дымовых газов за счет глубокой утилизации»

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

Диссертационная работа Мустафина Равиля Мансуровича посвящена разработке и исследованию схемы глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана на примере использования в составе высокотемпературной теплотехнологической установки.

1. Актуальность темы диссертационной работы

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 является их сравнительно низкая эффективность, во многом обусловленная высокой температурой отходящих дымовых газов.

Среди различных способов повышения энергетической эффективности высокотемпературных теплотехнологических установок (ВТУ) можно выделить термохимическую рекуперацию (ТХР) тепла отходящих дымовых газов, позволяющую достигать высокой степени рекуперации при умеренной температуре компонентов горения.

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 связи с этим тема настоящей диссертации, связанная с разработкой и исследованием технического решения повышения энергетической эффективности термохимической рекуперации тепла за счет паровой конверсии метана весьма актуальна.

Целью диссертационной 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.

2. Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства

Тема диссертационной работы соответствует:

- приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика;
- приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России: энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива;
- критическим технологиям: технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе.

3. Новизна результатов исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна работы обусловлена тем, что в ней:

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.

4. Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов

Практическая значимость определяется полученными результатами исследования, которые могут быть использованы при проектировании схем термохимической рекуперации тепла высокотемпературных теплотехнологических установок. Материалы диссертации могут быть использованы в учебном процессе технических вузов, ведущих подготовку бакалавров и магистров по направлениям подготовки 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Результаты работы частично внедрены в расчетную практику промышленного предприятия ООО «ТСК Волгаэнергопром», что подтверждается актом о внедрении. Также, результаты работы использованы при проведении исследований в рамках гранта РНФ №19-19-00327 на тему «Разработка и оптимизация технологии термохимической регенерации тепла 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 – Пашенко Д.И.).

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы для определения основных энергетических характеристик, оптимального режима работы реконструируемых ВТУ с термохимической рекуперацией тепла дымовых газов, а также при проектировании новых установок.

6. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Обоснованность и достоверность результатов исследования 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.

7. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению

Структура диссертационной работы соответствует цели и задачам исследования. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 132 страниц, включая 40 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 147 наименований.

Общий анализ содержания диссертационной работы производит впечатление последовательно проведенного исследования, направленного на получение новых теоретических и практических результатов в области решения проблемы повышения энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты за счет паровой конверсии метана.

Во введении автором обоснована актуальность избранной темы, определены цель, задачи и методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния использования углеводородного топлива в теплоэнергетике и теплотехнологии, а также проведен обзор патентно-информационных источников по теме исследования. Одним из перспективных способов повышения энергетической эффективности 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).

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.

Вторая глава диссертации 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. 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 выполнен, используя систему точного моделирования технологических процессов Aspen HYSYS. Реактор Гиббса использован для расчета состава продуктов конверсии в соответствии с протекающими химическими реакциями, информация о которых содержится в базе данных Aspen HYSYS.

Показано влияние термодинамических параметров (температура, давление, составы компонентов) на работу схемы термохимической рекуперации тепла дымовых газов в составе высокотемпературной теплотехнологической установки.

В третьей главе проводилось CFD-моделирование процессов тепломассообмена, протекающих в реакторе паровой конверсии метана, представляющий собой набор реакционных элементов, заполненных частицами никельсодержащего катализатора. Также в этой главе разработана и внедрена в расчет пользовательская функция, описывающая химическую кинетику реакции паровой конверсии метана по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда, на языке программирования C++. На пользовательскую функцию получено свидетельство регистрации программы для ЭВМ.

В результате расчетов получены контуры распределения температур и мольного содержания компонентов. Также в этой главе проводилось сравнение действительного процесса паровой конверсии метана с равновесным решением. 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. 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 ВТУ, с помощью применения ТХР тепла дымовых газов с глубокой утилизацией.

Также в этой главе проводился расчет окупаемости проекта. 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. Также выявлено, что при $\beta=1$ схемы окупаются практически одинаково, в случае с глубокой утилизацией срок составит 1 год, а в случае без глубокой утилизации срок составит 1 год и 4 месяца.

В заключении обобщены основные результаты проведенных исследований.

Содержание диссертационной работы обладает внутренним единством и подчинено единой цели и задачам исследования.

Оформление диссертации полностью соответствует нормативным требованиям. Изложение материала грамотное и логичное, сделанные выводы обоснованы.

Диссертация соответствует 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

При обсуждении диссертационной работы Мустафина Р.М. были высказаны следующие замечания и вопросы.

1. При анализе технико-экономической эффективности предлагаемого технического решения оно должно сравниваться с сопоставимым конкурирующим вариантом. Было бы целесообразно сравнивать установку термохимической утилизации с вариантом установки подогревателя воздуха, подаваемого на горение, работающим в тех же температурных условиях. В работе же сравнение производится с несопоставимым вариантом отсутствия тепловой регенерации вообще, за счет чего получаются завышенные показатели.
2. В работе предлагается использовать конденсат, полученный из продуктов сгорания для получения технологического водяного пара для смешения с исходным топливным газом в процессе каталитической конверсии. Конденсат, полученный из продуктов сгорания может иметь кислую реакцию, нейтрализации которой в системе химводоподготовки следовало бы уделить особое внимание, тем более что применяемые металлические катализаторы могут быть особо чувствительны к воздействию кислот и щелочей.
3. Для большей наглядности перед табл. 2.1 необходимо было бы привести температуры соответствующих потоков и представить вначале материальный баланс, а затем тепловой. При расчете теплового баланса неясно, каким образом определялись прочие потери d ? Поскольку от этой величины в данном случае будет зависеть сходимость теплового баланса.
4. В работе (рис. 2.11-2.15) не представлено объяснений полученных зависимостей рассмотренных величин от температуры.
5. Формула (2.25) – размерность расхода топлива, указанная в работе не позволяет получить значение коэффициента полезного использования тепла топлива в долях единицы.
6. Из работы не ясно чем обоснованы длины участков реакционного элемента (рис. 3.1).
7. Для лучшего понимания работы было бы желательным пояснить, что понимается под временем контакта с единицей измерения – $\text{кг}_{\text{кат}} \cdot \text{с} / \text{моль}_{\text{CH}_4}$.
8. Газ конверсии углеводородов имеет в своем составе большое количество водорода, монооксида углерода и балластных веществ и является низкокалорийным топливом. В связи

с чем, могут быть определенные ограничения на его использование в высокотемпературных технологических процессах и установках. Кроме того для осуществления термохимической утилизации нужны высокие температуры отходящих из печи дымовых газов. Было бы целесообразно установить рациональные промышленные технологические процессы и конкретные огнетехнические установки, в которых может быть использована термохимическая утилизация теплоты дымовых газов.

8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации

По структуре и содержанию автореферат полностью соответствует основным положениям диссертации и требованиям ВАК Минобрнауки России.

9. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

По теме диссертации опубликовано 15 печатных изданий, 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.

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.

10. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Мустафина Равиля Мансуровича «Повышение энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты дымовых газов за счет глубокой утилизации» является завершенной научно-квалификационной работой и имеет важное значение для развития научного направления, связанного с развитием теплоэнергетических систем, а именно для специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника. Поставленные в диссертационной работе задачи решены, цель работы достигнута. Выводы и рекомендации обоснованы применением опробованных расчетных методик и методов математического моделирования. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для повышения эффективности функционирования ВТУ за счет использования альтернативных видов топлива. *Теоретические результаты работы могут найти применение (в части обоснования*

рабочих параметров риформера, его конструкции, типа и формы применяемого катализатора) на промышленных предприятиях и ТЭС, использующих природный газ как основной вид топлива.

Диссертационная работа Мустафина Равиля Мансуровича на тему «Повышение энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты дымовых газов за счет глубокой утилизации» соответствует паспорту специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника и отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 20 сентября 2013 г. №842 (в актуальной редакции), а ее автор – Мустафин Равиль Мансурович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

Отзыв на диссертацию Мустафина Равиля Мансуровича на тему «Повышение энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты дымовых газов за счет глубокой утилизации» подготовлен на основании заключения, сделанного в результате заслушивания и обсуждения диссертации на заседании кафедры «Промышленная теплотехника (ПТ)» 22 апреля 2025 г., протокол №17.

Отзыв составили:

Д.т.н., профессор кафедры ПТ

К.т.н., доцент каф. ПТ

Зав. кафедрой ПТ, к.т.н., доцент

Кулешов О.Ю.

Мракин А.Н.

Озеров Н.А.

Полное наименование организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Телефон: +7 (8452) 99-86-03, +7 (8452) 99-86-04 - факс

Адрес электронной почты: sstu_office@sstu.ru, termo@sstu.ru

Сайт организации: <https://www.sstu.ru/>

Подпись <u>Кулешов О.Ю.</u> удостоверяю	Подпись <u>Мракин А.Н.</u> удостоверяю
Заместитель начальника управления кадровой работы	Заместитель начальника управления кадров
<u>23</u> 04 2025	<u>23</u> 04 2025 г.

Подпись <u>Озеров Н.А.</u> удостоверяю
Заместитель начальника управления кадровой работы
<u>23</u> 04 2025 г.