

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по
научной работе ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Ненашев М.В.

«21» 02 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Диссертация «Повышение энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты дымовых газов за счет глубокой утилизации» выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки Российской Федерации.

В 2021 г. Мустафин Равиль Мансурович окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» по специальности 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и получил диплом с отличием.

В период подготовки диссертации соискатель Мустафин Равиль Мансурович работал с 01.09.2021 г. по 30.06.2023 г. ассистентом, а с 01.09.2023 по настоящее время – старшим преподавателем и младшим научным сотрудником кафедры «Промышленная теплоэнергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки Российской Федерации.

В период с 01.09.2021 г. по настоящее время Мустафин Равиль Мансурович обучается в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки Российской Федерации по направлению подготовки 14.06.01 – Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии. С 26.06.2024 г. зачислен в качестве лица, прикрепленного для сдачи кандидатских экзаменов без

освоения программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Справка №СП-02.03/596 о сдаче кандидатских экзаменов, выдана 08.07.2024 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Пащенко Дмитрий Иванович работает в должности доцента кафедры «Промышленная теплоэнергетика» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» Минобрнауки РФ.

1. Актуальность темы

Считать тему диссертационной работы Мустафина Равиля Мансуровича актуальной в связи с тем, что в работе представлены результаты разработки и исследования технологии, повышающей энергетическую эффективность систем термохимической рекуперации тепла дымовых газов.

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, 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 связи с этим тема настоящей диссертации связана с разработкой и исследованием технического решения 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.

2. Степень научной ценности и новизны полученных результатов

Научная ценность и новизна диссертации определяется тем, что в ней разработана математическая модель химической кинетики реакций паровой конверсии метана по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда.

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.

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.

3. Личное участие автора в получении научных результатов

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.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

В научных изданиях 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 научных изданиях, индексируемых в 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.

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.

Основные научные результаты диссертационного исследования получены соискателем лично.

4. Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов

Научные положения диссертационного исследования, выводов и рекомендаций являются достоверными и обоснованными. 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.

5. Практическая ценность работы

Практическая значимость работы 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 диссертационной работы частично используются в расчетной практике ООО «ТСК Волгаэнергопром» (г. Самара).

6. Рекомендации по использованию полученных результатов

Рекомендовать использование результатов диссертационной работы Мустафина Р.М. при разработке, проектировании и внедрении схем термохимической рекуперации тепла высокотемпературных теплотехнологических установок.

7. Рекомендации по защите диссертационной работы

Работа Мустафина Равиля Мансуровича отвечает всем требованиям положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, в том числе пункту 14 о заимствовании материалов и (или) отдельных результатов.

Тема диссертационной работы «Повышение энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты дымовых газов за счет

глубокой утилизации» и ее содержание полностью соответствуют паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (п.2,3,7):

2. Термодинамические процессы и циклы применительно к установкам производства, преобразования и потребления энергии.

3. Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси.

7. 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.

Научные и практические результаты диссертации представлены в достаточном количестве работ, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки Российской Федерации.

Соискатель обладает глубокими профессиональными знаниями, имеет научные достижения в представленной области.

Законченная диссертационная работа «Повышение энергетической эффективности термохимической рекуперации теплоты дымовых газов за счет глубокой утилизации» Мустафина Рауля Мансуровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Заключение принято на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «СамГТУ», протокол № 6 от 20.02.2025 г.

Заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика»,
д.т.н., доцент

А.В. Еремин