

ОТЗЫВ

официального оппонента Попова Станислава Константиновича
на диссертационную работу Мустафина Равиля Мансуровича на тему
**«ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
ЗА СЧЕТ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности

2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Актуальность исследования. Диссертационная работа Мустафина Р.М. посвящена разработке и исследованию технологии глубокой термохимической рекуперации (ТХР) теплоты высокотемпературных отходящих дымовых газов на основе паровой конверсии природного газа. Эта технология позволяет повысить энергетическую эффективность высокотемпературных теплотехнологических установок, одновременно решая задачи уменьшения теплового загрязнения окружающей среды и снижения выбросов диоксида углерода.

Первым примером опытно-промышленного внедрения термохимической рекуперации тепла за счет паровой конверсии метана является система рекуперации стекловаренной печи Гусевского завода стекловолокна, реализованная группой ученых Московского энергетического института (МЭИ) под руководством И.И. Перелетова. Положительные результаты показали перспективность этого способа повышения энергетической эффективности. Одной из особенностей ТХР на основе паровой конверсии природного газа является безвозвратные потери водяного пара, используемого для конверсии, а 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 на основе паровой конверсии природного газа.

В диссертационной работе Мустафина Р.М. предлагается решение описанной выше проблемы. В основу этого решения положена глубокая рекуперация теплоты дымовых газов, которая позволяет не только использовать скрытую теплоту конденсации водяных паров, но и организовать рециркуляцию ранее безвозвратно теряемой воды, которая может использоваться для паровой конверсии.

Структура и содержание 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.

Во **введении** автором диссертационной работы Мустафиним Р.М. обосновывается актуальность темы, определяется цель, формулируется научная новизна, а также представляются положения, которые выносятся на защиту. Показывается практическая ценность полученных результатов и разработанных методов, приводится 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. Изложено и проанализировано большинство известных примеров промышленного и опытно-промышленного использования термохимической рекуперации теплоты на основе паровой конверсии природного газа для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок. Показаны основные преимущества использования такого способа повышения энергетической эффективности.

Обзор источников выполнен на высоком уровне, это достоинство работы.

Во **второй главе** описан термодинамический анализ предлагаемой схемы глубокой термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов на основе паровой конверсии метана в составе высокотемпературной теплотехнологической установки (ВТУ). Представлены результаты проведенных расчетов в программном комплексе Aspen Hysys.

В **третьей главе** изложены результаты CFD-моделирования процессов теплообмена, протекающих в реакторе паровой конверсии метана, который представляет собой набор реакционных элементов, заполненных частицами никельсодержащего катализатора. Для протекания паровой конверсии метана автором разработана пользовательская функция, которая встраивалась в модель Fluent. Посредством разработанной CFD-модели исследовано отношение степени конверсии метана для неравновесных условий к степени конверсии метана для условий равновесия в зависимости от температуры дымовых газов и соотношения «пар – метан».

В пункте 3.2 «CFD-моделирование реактора с большим количеством катализаторов в реакционном пространстве» число элементов расчетной сетки определено на основе анализа сеточной сходимости (рисунок 3.2), что является достоинством работы.

Также достоинством работы является то, что упомянутый выше сопоставительный анализ степени конверсии проведен при варьировании такого показателя, как время контакта в размерности (кг катализатора·с)/моль CH_4 . Это делает полученные результаты применимыми к другим аналогичным реакторам.

В четвертой главе приведено технико-экономическое обоснование разрабатываемой технологии. Выполнены расчеты годовых затрат и срока окупаемости для предлагаемой схемы.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

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

К новым, наиболее значимым научным результатам, полученным соискателем Мустафиным Р.М. в диссертационной работе, можно отнести следующие:

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 соотношений «пар – метан».

Из основных результатов, имеющих практическую значимость, можно отметить следующие:

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.

Обоснованность и достоверность научных положений и результатов диссертации не вызывают сомнений. Они обеспечиваются использованием современных теоретических и экспериментальных данных, высокоточных методов компьютерного моделирования, а также хорошей сходимостью численных исследований термодинамики процесса, проведенных в работе, с данными, полученными другими исследователями.

Результаты, представленные в тексте диссертации Мустафина Р.М., прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 15 печатных изданиях, в том числе 2 статьи 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.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат полностью и достоверно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

Замечания по диссертации

1) На рис. 2.8 (страница 52) представлена расчетная схема ТХР с глубокой утилизацией тепла дымовых газов, построенная в программе Aspen Hysys. Принято, что в конденсаторе теплота, выделяющаяся при конденсации водяных паров, расходуется на испарение такого же количества воды. Однако надо иметь в виду, что конденсация водяных паров из дымовых газов идет при атмосферном давлении, а испарение – при повышенном давлении и, следовательно, при большей температуре. В таком случае передача теплоты от потока с конденсацией к потоку испаряющемуся невозможна согласно второму началу термодинамики.

2) На странице 62 изложено:

Для проверки достоверности созданной модели в Aspen Hysys, проводится ее верификация. Верификация модели осуществляется путем сравнения полученных результатов с результатами, представленными в статье авторов Верхивкера и Кравченко [14]. В таблице 2.2 приведены результаты из упомянутой статьи. В их работе было использовано соотношение окислителя к метану $\beta = 2\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$.

Замечание: это не верификация модели, когда расчеты сравниваются с расчетами. Результат такого сопоставления позволяет сделать вывод о непротиворечивости полученных данных известным данным других авторов, но не более того. Процесс верификации должен строиться на сопоставлении с экспериментальными данными.

3) На странице 64 изложено:

Также проводилось сравнение с экспериментальными данными из статьи авторов Адриса, Лима и Грейса [127]. Они проводили исследование разных типов реакторов

паровой конверсии метана. Результаты из их статьи приведены в таблице 2.4, данные выбраны только для классического реактора,

В этой связи – два замечания.

1) Непонятно, что автор называет классическим реактором. Общепринятое возведение какого-либо реактора в ранг классического еще не состоялось.

2) В статье Адриаса, Лима и Грейса экспериментальные данные, полученные на реакторе с кипящим слоем, сравниваются с расчетными данными для реактора идеального смешения. Соискатель свои расчетные данные сравнивает с расчетными данными из статьи для реактора идеального смешения. Следовало бы использовать из статьи для верификации своей модели не расчетные, а экспериментальные данные. Был бы получен позитивный результат верификации, но более убедительный.

4) На странице 73 отмечено:

Кинетическая модель химического реагирования основана на модели Лэнгмюра-Хиншельвуда и взята из широко известной работы Ксу и Фроменга [31]. Эта модель была реализована в пользовательской функции, написанной на языке программирования C++.

Замечание: создание упомянутой пользовательской функции выделено как одна из задач исследования. По сути соискатель взял из литературы набор известных формул и написал программный код. Непонятно, почему этому небольшому этапу работы придается столь большое значение и вес, включая оформление свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

5) В пункте 3.3 «Верификация CFD–модели» нет ссылок на источники, в которых были опубликованы описание экспериментального стенда и выполненные на нем работы.

6) На странице 82 отмечено:

Для определения экономической эффективности разрабатываемой схемы необходимо провести сравнительный экономический анализ. Для этого проводится сравнение экономических показателей для работы нагревательной печи с расходом топлива 5000 м³/ч, с температурой дымовых газов 1200 °С, при реализации различных схем рекуперации тепла: 1 – без рекуперации тепла отходящих дымовых газов, 2 – при термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана, 3 – при термохимической рекуперации тепла отходящих дымовых газов за счет паровой конверсии метана с конденсацией водяных паров из дымовых газов.

Таким образом, в качестве базового варианта выбрана нагревательная печь достаточно большой тепловой мощности, но без какой-либо рекуперации теплоты отходящих газов. Вызывает сомнения, что такая заведомо неэффективная печь где-либо существует. Более корректным представляется выбор в качестве базового варианта печи с термической рекуперацией (хотя бы с подогревом воздуха до 400 °С).

7) На странице 84 отмечено:

Расчеты проводились при количестве рабочих дней в году равных 247 дней и работе оборудования 9 часов в день с 8:00 до 17:00.

Соискателем рассматривается в качестве базового варианта печь с расходом топлива $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$, с удельным расходом топлива 68 кг у.т./т (см. рис. 4.2). Отсюда несложно установить, что производительность печи – 90 т/ч ($= 5000 \cdot 36 / 29,3 / 68$). Это достаточно высокая агрегатная производительность.

Судя по графику работы (9 часов в сутки), это печь периодического действия. В год она работает $247 \cdot 8 = 1976$ часов. В четыре раза меньше, чем обычно принимается для непрерывно действующих печей (8000 ч/год).

Чем обусловлен довольно странный выбор параметров базового объекта для выполнения экономического анализа? Существует ли в реальности аналог базового варианта: нагревательная печь периодического действия производительностью 90 т/ч , работающая в общей сложности 82 суток в году?

8) В работе имеется ряд опечаток. Например:

Страница 59: «с глубокой **у**литизацией».

Страница 65: «максимальное отклонение **составляет** 4,67%».

Страница 73: «теплопроводность металлической стенки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ »;

Страница 78: «На рисунке 3.9 **показан** контуры мольного содержания»

Страница 79: «**Далле** проводилось сравнение результатов»

Указанные замечания не влияют на качество полученных результатов и положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Представленная к защите диссертационная работа Мустафина Равиля Мансуровича посвящена актуальной теме – повышению уровня энерго- и ресурсосбережения в высокотемпературных теплотехнологических установках, отапливаемых природным газом. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, при выполнении которой диссертант продемонстрировал достаточно высокую научную квалификацию. Поставленные в исследовании задачи решены, а цель исследования достигнута. Личный вклад автора в работу не вызывает сомнений.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, содержит в сжатом виде всю необходимую информацию по работе. Публикации автора соответствуют теме диссертационной работы, включают в себя ее основное содержание.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)».

По объему исследований, уровню новизны, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени

кандидата технических наук, установленным пунктами 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней».

Считаю, что автор диссертации Мустафин Равиль Мансурович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)».

Доктор технических наук (05.14.04),
профессор кафедры «Инновационных
технологий наукоемких отраслей
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, вн. тер. г.
муниципальный округ Лефортово, ул.
Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 362-79-84
E-mail: popovsk@mpei.ru

Попов
Станислав Константинович

подпись, дата

16.04.2025

Подпись Попова Станислава Константиновича удостоверяю



Заместитель, начальника
Администрации в работе с персоналом
Л.И. Полевая