


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет
«МЭИ»




В.К. Драгунов
«30» октября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Печенкина Александра Вадимовича
**«Утилизация водородсодержащих отходов нефтепереработки в гибридной
энергосистеме с высокотемпературным топливным элементом»**
представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

На отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, включая 74 рисунка и 24 таблицы.

Актуальность темы выполненной работы

Повышение энергоэффективности и снижение экологических последствий при производстве тепловой и электрической энергии может быть достигнуто за счет использования новых и более эффективных энергетических установок. Примером таких установок являются гибридные системы, основанные на высокотемпературных топливных элементах и газовых турбинах, которые способны значительно сократить выбросы парниковых газов и повысить общий коэффициент полезного действия системы. Для обеспечения экологической эффективности гибридных энергетических систем предлагается использовать блоки для улавливания CO₂.

Особенностью работы твердооксидных топливных элементов является их способность функционировать на любом углеводородном топливе. Протекание электрохимических процессов в элементе определяется составом используемого

топлива и температурой. В случае применения неконструктивных видов топлива исследуются рабочие и технические параметры системы.

Для эффективного использования газовых отходов нефтехимических предприятий, которые содержат в своем составе большое количество углеводородов и водорода, вместо сжигания в атмосфере или использования в энергетических установках появляется возможность их эффективного применения в электрохимическом процессе с использованием топливных элементов. Однако при работе системы на газовых отходах следует учитывать необходимость их дополнительной очистки и подготовки, включая подготовку топливного газа, удаление серосодержащих примесей, чтобы обеспечить оптимальную работу топливного элемента и предотвратить возможные негативные последствия для окружающей среды и оборудования.

Проведение экспериментальных исследований работы топливного элемента в различных режимах эксплуатации не всегда представляется возможным из-за высоких капитальных затрат, даже в лабораторных масштабах. В связи с этим, создание цифровых моделей становится важным инструментом для экономии финансовых ресурсов и сокращения времени на разработку опытных образцов. Моделирование топливного элемента требует учета электрохимических преобразований, а при моделировании газовой турбины – процессов, протекающих в ней. При гибридизации процессов необходимо учитывать совокупность процессов и архитектуру гибридной системы. Эти задачи можно решить с помощью численного моделирования.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы обладает безусловной актуальностью и научной значимостью для изучения процессов переработки промышленных отходов, получения из них энергии с высоким КПД и снижении выбросов парниковых газов, в т.ч. с использованием методов численного моделирования.

Общая характеристика работы

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, изложены научная новизна, цели и задачи исследования, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются современные высокоэффективные системы преобразования энергии, включающие в себя высокотемпературные топливные элементы. Проводится анализ существующих опытно-промышленных образцов, а также результатов теоретических расчетов гибридных систем, использующих высокотемпературный топливный элемент. Описываются особенности различных конструкций установок и особенности использования топлива. Также в данной главе рассматривается вопрос о проектировании новых и модернизации существующих промышленных установок, который в настоящее время связан с использованием численных методов моделирования. В главе приводится анализ результатов исследований

отечественных и зарубежных ученых в области математического моделирования топливных элементов. Описываются основные методы и способы моделирования систем. Помимо этого, в этой главе анализируются существующие технологии подготовки различных видов топлива для гибридных энергосистем. Рассматриваются способы декарбонизации процесса производства тепловой и электрической энергии.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований по подготовке к использованию в гибридной энергосистеме топлива, полученного в виде отходов нефтехимического предприятия. Было проведено сравнение разработанных композиций адсорбентов с эталонными по таким параметрам, как улавливающая способность по отношению к соединениям серы и механическая прочность. Результаты показали, что характеристики разработанных адсорбентов не уступают эталонным.

Был также разработан адсорбент-индикатор, позволяющий определить необходимость замены или регенерации первой ступени адсорбента путем изменения его окраски. После очистки топливный газ подвергается процессу предварительного риформинга для получения синтез-газа с повышенным содержанием водорода, пригодного для использования в топливном элементе.

На основе лабораторного эксперимента представлена технологическая схема по улавливанию углекислого газа в составе гибридной энергетической системы с высокотемпературным топливным элементом. Данная схема является перспективной, благодаря своей замкнутой структуре и возможности интеграции с существующими ТЭС.

В третьей главе подробно описывается разработка технологической схемы гибридной энергетической системы с твердооксидным топливным элементом (ТОТЭ), которая функционирует на нефтегазовых отходах. При этом учитываются различные варианты работы блоков и направление материальных потоков. Предложены принципиально новые схемы производства энергии из отходов нефтепереработки. Проведен расчет состава синтез-газа после предварительного риформинга с целью его использования в ТОТЭ.

Описанная система мощностью 30 кВт представляет собой опытно-промышленный образец, с помощью которого были проведены исследования режимов функционирования блоков оборудования. Разработанная система предлагается для использования в распределенной энергетике или в составе существующих ТЭС с целью экономии топлива. Это достигается за счет использования получаемого тепла и электроэнергии в гибридной энергосистеме, оснащенной топливным элементом. Все применяемые блоки представлены с подробной характеристикой оборудования.

В четвертой главе описана математическая модель гибридной энергосистемы. Рассчитаны параметры работы ТОТЭ на различных типах топлива, включая водородное, метан и полученный синтез-газ. Созданная модель ТОТЭ соответствует реальной топливной ячейке производства компании

Ningbo SOFCMAN. Построенная модель в программе Ansys показала высокую степень соответствия результатов расчетов данным производителя при работе на водородном топливе.

Результаты математических расчетов, представленные в главе, позволяют создавать и проектировать гибридные системы с учетом применяемого оборудования.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы и перспективы дальнейших исследований.

Результаты диссертации отражены в опубликованных работах автора в рецензируемых научных журналах в соответствии с требованиями Положения ВАК о присуждении научных степеней.

Значимость результатов для развития соответствующей отрасли науки, научная новизна исследований

Результаты исследования являются значимым вкладом в развитие технологии энергетических систем и автономных систем энергоснабжения за счет создания эффективного процесса выработки энергии на отходах промышленного производства. Созданы математические модели, позволяющие прогнозировать режимы работы системы в зависимости от ее архитектуры, состава, параметров газовых потоков и процессов тепломассообмена. Также в работе представлена возможность использования в качестве топлива углеводородных газовых отходов нефтеперерабатывающих производств, прошедших десульфуризацию и подготовку, в высокотемпературных топливных элементах. Разработанные технологии и модели приняты к внедрению на предприятиях ПАО «Татнефть», а также могут быть использованы на предприятиях других компаний в Российской Федерации.

Научная новизна представлена следующими положениями:

Создана математическая модель гибридной энергетической системы, включающая в себя систему подготовки газовых отходов нефтепереработки к использованию в качестве топлива. Модель позволяет рассчитать процесс риформинга для получения синтез-газа, а также работу твердооксидных топливных элементов, учитывая гидродинамические, электрохимические и тепломассообменные процессы, тепловые и газодинамические характеристики газовой микротурбины, а энергетические потоки между различными блоками гибридной энергосистемы. Кроме того, система позволяет утилизировать тепловые и углеродные выбросы.

Предложен метод десульфуризации топливного газа на основе экспериментальных исследований и физико-химических методов анализа, который позволяет снизить содержание соединений серы в топливе до 1.5 ppm.

Предложены несколько вариантов архитектуры гибридной энергетической системы с разными режимами работы блоков, движения

материальных потоков между ними и процесс производства энергии с высоким электрическим КПД.

Разработана технологическая схема для эффективного преобразования водородсодержащих углеводородных отходов глубокой переработки нефти в энергию, и проведен расчет основных параметров эффективности опытно-промышленной гибридной энергосистемы суммарной мощностью 30 кВт.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается согласованностью результатов модели с экспериментальными данными, сопоставимостью с данными других авторов по тематике исследования, использованием апробированных методик по ГОСТ при проведении экспериментальных исследований, использованию сертифицированных контрольно-измерительных приборов.

Основные положения и результаты диссертации представлены на 4 конференциях. По материалам исследований опубликовано 13 работ, из которых 4 в научных журналах из перечня ВАК РФ, 5 в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 4 в других изданиях.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности научных работников 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы: п. 1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования; п.2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии; п. 3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок; п. 5. Разработки и исследования в области энергосбережения и

ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах; п. 6. Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов

Результаты исследования могут быть использованы для разработки эффективных энергетических систем, включая большую и малую энергетику.

Разработанная математическая модель гибридной энергосистемы позволяет проводить расчеты влияния входных параметров по составу, температуре, давлению, расходу окислителя на выходные тепловые и электрические характеристики гибридной энергосистемы, что может использоваться для создания нового энергетического оборудования, обеспечивающего эффективное использование энергетических ресурсов и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Как проводился расчет КПД гибридной системы? Учитывался ли расход адсорбентов и возможные энергозатраты, связанные с этим, при определении КПД гибридной системы?
2. Насколько значимым является использование энергоустановки мощностью 30 кВт на большом промышленном предприятии?
3. За счет чего будет достигаться экономическая эффективность предлагаемых гибридных энергосистем? Рассчитывался ли экономический эффект от получаемой в системе тепловой энергии?

Заключение по диссертационной работе

Поставленные задачи в диссертационной работе раскрыты достаточно полно и последовательно, выводы и рекомендации диссертанта были обоснованы, а полученные им научные результаты имеют существенное значение для практики. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и отвечает требованиям ВАК при Министерстве науки высшего образования Российской Федерации.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Печенкина А.В. на тему: «Утилизация водородсодержащих отходов нефтепереработки в гибридной энергосистеме с высокотемпературным топливным элементом» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп. 9-14 Положение о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. в редакции от 18.03.2023 г.) и рекомендуется к защите по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Диссертация и отзыв были рассмотрены на заседании кафедры Промышленных теплоэнергетических систем № 9/23 от 11.10.2023 г.

Отзыв подготовлен 30.10.2023 г.

Заведующий кафедрой
Промышленных теплоэнергетических систем
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
кандидат технических наук, доцент

Яворовский Юрий
Викторович

111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул.
Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
Телефон: (495) 362-75-53
e-mail: YavorovskyYV@mpei.ru

Сведения о лице, утвердившем отзыв
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
Виктор Карпович Драгунов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул.
Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
Телефон: (495) 362-77-77
e-mail: universe@mpei.ac.ru