

ОТЗЫВ

официального оппонента **Шалухо Андрея Владимировича** на диссертацию **Печенкина Александра Вадимовича** на тему «**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.

Актуальность темы диссертации

Активный рост промышленности и увеличивающийся спрос на энергоресурсы создают необходимость развития и совершенствования энергетических систем с использованием передовых научных, технических и цифровых решений. Применение гибридных систем в составе с топливными элементами и газовыми турбинами позволяет совместно решать пробелы негативного влияния энергоустановок на окружающую среду и низкой эффективности энергетических систем.

Разработка гибридных энергетических систем, использующих в качестве топлива отходы нефтехимических предприятий, является актуальной задачей, решению которой посвящена диссертационная работа.

Особенностью работы высокотемпературного топливного элемента с расплавленным электролитом, заключается в возможности электрохимически преобразовать практически любое углеводородное топливо в тепловую и электрическую энергию. В качестве топлива возможно использовать промышленные газовые отходы в качестве неконструктивного вида топлива с дополнительной подготовкой. Поэтому в системе необходимо учесть режимы работы и технические параметры установок.

Структура, объем и оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 184 наименований. Общий объем работы 151 стр., в том числе 74 рисунка, 24 таблицы и 5 приложений.

Краткая характеристика выполненной работы:

1. Во введении представлены актуальность, цель, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, достоверность и реализация результатов работы, апробация и связь с приоритетными научно-исследовательскими направлениями.

2. В главе 1 выполнен анализ существующих и разрабатываемых гибридных систем с топливным элементом. Проведен анализ методов моделирования и программных продуктов для выполнения расчетов различных систем, с учетом архитектуры системы и вида используемого топлива. На основании изученных данных сформулированы задачи и цель диссертационного исследования.

3. В главе 2 выполнены экспериментальные исследования по использованию физико-химического метода анализа для определения

качественного и количественного состава топливного газа, который образуется в виде газовых отходов на нефтехимическом предприятии. Топливный газ был использован в качестве источника энергии для гибридной энергетической системы. На основе принципов экологичности, экономичности и доступности были разработаны различные композиции адсорбентов. Проведен сравнительный анализ разработанных адсорбентов с эталонными образцами по таким параметрам, как поглощение соединений серы в топливном газе и механическая прочность. Результаты показали, что характеристики разработанных адсорбентов приближаются к значениям эталонных “дорогих” адсорбентов, что делает их предпочтительным выбором для использования в адсорберах. Также был разработан адсорбент-индикатор, изменение окраски которого позволяет определить, когда требуется регенерация или замена первой ступени адсорбента. Предварительно очищенный топливный газ проходит процесс предварительного риформинга для получения синтез-газа с высоким содержанием водорода, что позволяет использовать его в топливном элементе. Кроме того, во второй главе описана технологическая схема улавливания углекислого газа из дымовых выбросов гибридной энергетической системы. Представленная схема позволяет значительно снизить выбросы углекислого газа в атмосферу.

4. В главе 3 представлено описание разработанной технологической схемы гибридной энергетической системы с высокотемпературным топливным элементом, работающей на нефтегазовых отходах с различными вариантами функционирования блоков и движением материальных потоков в ней. Опытно-промышленный образец данной системы мощностью 30 кВт включает расчет режимов работы блоков и предлагает использование в распределенной энергетике или в качестве дополнения к действующим тепловым электростанциям. Это обеспечивает экономию топлива за счет использования получаемого тепла и электроэнергии от гибридной системы с топливным элементом.

5. В главе 4 выполнено математическое моделирование гибридной энергетической системы на основе твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ). Разработана цифровая модель ТОТЭ, которая имеет высокую сходимость с результатами экспериментальных данных работы ТОТЭ на водородном топливе. Математическая модель позволяет анализировать все внутренние процессы, происходящие в ТОТЭ при использовании различных видов топлива, включая газовые отходы нефтепроизводства. Сравнение работы ТОТЭ проводилось с учетом таких параметров, как расход топлива/воздуха, входная температура и изменение напряжения ячейки. Было установлено, что работа на синтез-газе дает результаты, аналогичные результатам при использовании метана, что делает использование отходов нефтепроизводства целесообразным. С помощью математического расчета микрогазовой турбины были определены основные параметры при различных режимах работы. Верификация модели выполнена с использованием данных от производителя. В главе также выполнены расчеты всех блоков и экономический анализ. Полученная стоимость производства 1 кВтч

электроэнергии является высокой. Однако использование данной технологии, позволяет значительно снизить вредное воздействие на окружающую среду со стороны предприятий нефтехимической промышленности и тепловых электростанций. Кроме того, следует отметить, что развитие водородных технологий приведет к снижению стоимости аналогичного оборудования в ближайшем будущем.

Научная новизна

Автором разработана математическая модель гибридной энергосистемы, включающая систему подготовки к использованию в качестве топлива газовых отходов нефтепереработки, расчет состава синтез-газа. Также в состав математической модели входит цифровая инженерная модель твердооксидного топливного элемента с одновременным учетом гидродинамических, электрохимических, тепломассообменных и газодинамических процессов, а также расчет характеристик газовой микротурбины, энергетических потоков между блоками, утилизацию углеродных выбросов гибридной энергосистемы.

На основе экспериментальных исследований автором предложен метод десульфуризации для водородсодержащих углеводородных газовых отходов, который обеспечивает низкое содержание серы в топливном газе.

В диссертации автор представил разработанные архитектуры гибридной энергосистемы с различными вариантами движения материальных потоков, которые обеспечивают декарбонизированное и высокоэффективное производство энергии с электрическим КПД свыше 60% и общим КПД более 97% (в зависимости от мощности установки).

Диссертант Печенкин А.В. разработал технологическую схему опытно-промышленной гибридной энергосистемы суммарной мощностью 30 кВт и выполнил математический расчет основных параметров эффективности выработки энергии в водородно-электрохимическом процессе при работе на газообразных водородсодержащих отходах нефтеперерабатывающих химических предприятий.

Теоретическая и практическая значимость заключается в возможности прогнозирования рабочих параметров устройств на основе разработанной математической модели гибридной энергосистемы при использовании неконструктивных видов топлива для более эффективного производства энергии. Предложенные методы подготовки газовых отходов нефтеперерабатывающей промышленности в качестве топлива могут быть использованы как для топливных элементов, так и на предприятиях энергетического сектора промышленности.

Достоверность результатов выполненной диссертационной работы подтверждается обширными графическими и табличными материалами, полученными с помощью экспериментальных и математических исследований, и не вызывает сомнений. Достоверность подтверждается

использованием аттестованных и гостированных методик, а также современного оборудования, вычислительных систем для математического анализа, физико-химических измерительных устройств, прошедших сертификацию, согласованностью математической модели с результатами рабочих характеристик оборудования, не противоречивостью базовым законам гидродинамики, термодинамики, физики, химии и информатики.

Замечания и пожелания:

1. В диссертации подробно рассмотрены особенности конструкции и работы твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), однако не отмечен ряд недостатков, затрудняющих их применение в системах электроснабжения. В частности, ТОТЭ характеризуются низкой маневренностью (требуется значительное время для изменения выработки электроэнергии). В Главе 3 следовало бы пояснить, как данный вопрос учитывается при разработке архитектуры гибридной энергетической системы.

2. Выбор состава и мощности гибридных энергетических систем, в том числе, зависит от установленной мощности и режимов работы потребителей, питание которых с помощью данных системы предполагается осуществлять. В диссертации следовало бы привести краткую характеристику потребителей электрической энергии нефтеперерабатывающих предприятий и использовать это при обосновании выбора мощности гибридной энергосистемы на основе ТОТЭ и газовой микротурбины.

3. В качестве одного из основных блоков разработанной гибридной энергетической системы указан блок силовых батарей (п. 3.6). При этом в таблице 3.2, в которой приведены технические параметры энергетических установок в составе гибридной системы, характеристики данного блока отсутствуют.

4. В Главе 4 при расчете полной стоимости вырабатываемой электроэнергии срок работы оборудования принят 10 лет. Однако в научно-технических публикациях при оценке ресурса работы ТОТЭ приводятся значения до 60 000 часов.

5. В диссертации разработана математическая модель и система расчета гибридной энергосистемы, позволяющие обосновать выбор оптимальных параметров системы на основе комплексного учета многих составляющих. В качестве дополнения в работе было бы возможно отметить деградацию ТОТЭ в период эксплуатации и возможное влияние данного процесса на эффективность работы гибридной энергетической системы.

6. В диссертации не рассмотрена возможность использования других производителей и типов топливных элементов для создания гибридной энергосистемы.

Представленные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы, не противоречат основным положениям, выводам диссертации.

Заключение по диссертационной работе

Выполненная диссертационная работа является законченным научным исследованием на соискание ученой степени кандидата наук. В работе содержится решение ряда проблем, связанных с возможностью использования отходов нефтепроизводства в энергетических системах с целью получения тепловой и электрической энергии при снижении выбросов вредных веществ в атмосферу.

Представленная диссертационная работа Печенкина А.В. на тему: «Утилизация водородсодержащих отходов нефтепереработки в гибридной энергосистеме с высокотемпературным топливным элементом» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в редакции от 18.03.2023 г.) и ее автор заслуживает присуждение ученой степени кандидата наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент

Доцент кафедры «Электроэнергетика,
Электроснабжение и силовая электроника»

Нижегородского государственного
технического университета

им. Р.Е. Алексеева,

к.т.н., доцент

Андрей Владимирович Шалухо

Подпись Шалухо А.В. удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета

Нижегородского государственного
технического университета

им. Р.Е. Алексеева

к.т.н., доцент



Игорь Николаевич Мерзляков

19.10.2023

Почтовый адрес: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Тел. +7 (831) 432-91-85

E-mail: shaluko@nntu.ru