

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Рябова Георгия Александровича  
на диссертацию

**Печенкина Александра Вадимовича**

«Утилизация водородосодержащих 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 работы** определяется современными задачами циркулярной экономики (наиболее полного использования отходов) и декарбонизацией производств (снижением выбросов парниковых газов). Поэтому, тематика и результаты диссертационной работы являются, безусловно, актуальными. Объединение таких эффективных и экологически чистых энергетических установок, как топливные элементы с высокопроизводительными газовыми турбинами позволяет одновременно снизить выбросы парниковых газов и повысить общий коэффициент полезного действия системы. Для осуществления стратегии «нулевого выброса» парниковых газов гибридные системы с высокотемпературным твердооксидным топливным элементом (ТОТЭ) предлагается оснащать модулем улавливания  $\text{CO}_2$ . Ключевыми моментами при проектировании гибридной системы являются риформинг топлива, архитектура материальных потоков и аппаратов с созданием когенерационного или тригенерационного циклов. Пока еще имеющиеся научные достижения в этой области не достаточны и имеется насущная необходимость продолжать разрабатывать технологии водородной энергетики для использования на индустриально-энергетических комплексах. Следует учитывать, что на нефтеперерабатывающих заводах или химических предприятиях с водородным производством основным отходом являются углеводородные газовые смеси, которые можно использовать в качестве топлива в гибридной системе. Эти газовые отходы дожигаются в факелах, либо подмешиваются к природному газу в малом количестве (2-10%) и сжигаются в энергетических установках. Актуальным представляется использовать эту газовую смесь для выработки энергии в гибридной энергоустановке с топливным элементом. В связи с этим задача эффективной и экологически чистой утилизации газовых отходов предприятий нефтепереработки с получением электрической и тепловой энергии в цикле гибридной энергосистемы с топливным элементом представляется весьма актуальной.

## **Цель и сильные стороны работы**

Основной целью диссертационной работы является разработка научных основ процесса производства энергии с минимальными выбросами CO<sub>2</sub> из водородсодержащих газовых отходов глубокой переработки нефти в гибридной энергосистеме с высокотемпературным топливным элементом.

Сильной стороной диссертационной работы является проведенный анализ и результаты математического моделирования и расчета гибридной энергосистемы, основанные на достоверной идентификации производительности и прогнозировании рабочих характеристик гибридной энергосистемы в зависимости от параметров подаваемой газовой топливной смеси для ее эффективной утилизации с высокими энергетическими, экономическими и экологическими показателями. Ценными является результаты экспериментальных исследований, включающие физико-химические характеристики, качественный и количественный состав и способы десульфуризации водородсодержащих углеводородных газовых отходов глубокой переработки нефти. Важными являются разработанные автором схемные решения энергосистемы, а также результаты инженерного расчета аппаратов химического, электрохимического превращения в составе гибридной энергосистемы и разработка технологической схемы гибридной энергосистемы высокотемпературный топливный элемент - газовая микротурбина на углеводородных газовых отходах нефтеперерабатывающих предприятий в качестве топлива.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- Разработана математическая модель и система расчета гибридной энергосистемы, включающая систему подготовки газовых отходов нефтепереработки, расчет состава синтетического газа после риформинга, цифровую инженерную модель твердооксидного топливного элемента, расчет энергетических потоков между блоками гибридной системы, утилизацию тепловых и углеродных выбросов этой энергосистемы.
- Предложен метод десульфуризации топливного газа с остаточным содержанием соединений серы менее 1,5 ppm, на основе экспериментальных исследований качественного и количественного состава и свойств водородсодержащих углеводородных газовых отходов глубокой переработки нефти.
- Разработаны новые схемные решения гибридной энергосистемы с вариантами устройства и функционирования блоков, движением материальных потоков между ними, обеспечивающие высокоэффективный процесс производства энергии с электрическим КПД более 60%

- Разработана технологическая схема и проведен математический расчет основных параметров эффективности опытно-промышленной гибридной энергосистемы суммарной мощностью 30 кВт с использованием газообразных водородсодержащих отходов нефтеперерабатывающих химических предприятий.

#### **Степень обоснованности научных положений.**

Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах.

**Достоверность основных положений и выводов**, полученных в диссертации, подтверждается корректной постановкой задач, применением апробированных математических моделей и программных продуктов, а также хорошим совпадением результатов численного моделирования исходных схем с реальными эксплуатационными данными. Полученные в диссертационной работе результаты экспериментальных данных по аттестованным и гостированным методикам согласуются с литературными данными.

#### **Теоретическая значимость работы**

Теоретическая значимость состоит в развитии методов использования газообразных отходов нефтепереработки и обосновании возможности получения тепловой и электрической энергии с помощью разработанной математической модели и системы расчета предложенных технологических схем гибридной системы с высокотемпературным топливным элементом.

#### **Практическое значение** диссертационной работы заключается в следующем:

- Полученные в диссертационной работе данные могут быть использованы для прогнозирования на основе разработанной цифровой модели ТОГЭ рабочих параметров гибридной электрохимической- механической системы с целью более эффективной генерации энергии.

- Предлагаемый метод подготовки газов отходов нефтеперерабатывающих позволяет использовать их для высокотемпературного топливного элемента.

- Разработанные технологии и модели приняты к внедрению на предприятиях ПАО «Татнефть».

## **Апробация работы**

Материалы, отражающие содержание диссертационной работы, представлены в 4 публикациях в журналах из перечня ВАК РФ, 5 публикациях международной системы цитирования Scopus и Web of Science. Всего 13 публикаций. Принято очное участие с тезисами докладов по теме диссертационной работы на 4 международных и всероссийских конференциях. Публикации в должной мере отражают содержание работы.

## **Структура, объём и основное содержание работы**

Диссертационная работа Печенкина Александра Вадимовича представлена на 193 страницах машинописного текста, из которых основной текст составляет 150 страниц, включает 74 рисунка, 24 таблицы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 184 источника (66 на русском языке и 118 на английском языке), и 5 приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, разработанность в России и мире, сформулированы цель исследования, обоснована научная новизна и практическая ценность работы.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору опубликованных в литературе результатов разработок гибридных систем с топливными элементами по получению тепловой и электроэнергии. Проанализированы опытно-конструкторские разработки состава и общей схемы функционирования, изучены численные методы моделирования и программные пакеты расчета, а также рассмотрено влияния вида и состава топлива на показатели работы гибридных энергетических систем с топливными элементами. Определены основные проблемы, которые связаны с топливными потоками внутри ТОГЭ и их воздействием на производительность и эффективность всей гибридной системы. Показано, что различные виды топлива могут использоваться для выработки энергии в гибридной энергосистеме, но предпочтение следует отдавать промышленным отходам и биоотходам из-за сопутствующего решения экологических проблем. На основе обзора предложены направления исследований.

Во **второй главе** выполнен анализ возможности применения и даны результаты экспериментальных исследований по подготовке к использованию в гибридной энергосистеме углеводородных газовых отходов нефтеперерабатывающих предприятий, а также результаты экспериментальных исследований, направленных на снижение выбросов CO<sub>2</sub>. На первом этапе проводили эксперименты по разработке сорбционных материалов для удаления соединений серы. В результате был выбран композитный

материал бентонит, полученный в виде частиц сложной формы с высокой пористостью, в связи с низкой стоимостью, доступностью, высокой улавливающей способностью, экологичностью материалов. Остаточное содержание соединений серы в топливном газе после адсорбционной очистки данным материалом не превышает в среднем 2 мг/м<sup>3</sup> (1,5 ppm) и соответствует требованиям ГОСТ для газообразного топлива энергетических установок. При использовании топливного газа в гибридной установке весь поступивший образуется углекислый газ. Предлагается использование дешевых, доступных и нетоксичных реагентов в составе технологии улавливания выделяющегося углекислого газа. Результатом экспериментального лабораторного исследования по улавливанию углекислого газа явилась разработанная технологическая схема с использованием принципа замкнутого цикла. Она предусматривает использование растворов натриевой щелочи 6% и гашеной извести 6%.

В **третьей главе** изложена суть технологической схемы гибридной энергосистемы на нефтегазовых отходах с высокотемпературным топливным элементом для процесса получения энергии на индустриально-энергетическом комплексе. Даны разработанные принципиальные технологические схемы с различными конфигурациями блоков для разных режимов работы гибридной системы, а также технические характеристики энергетических установок в составе гибридной системы. За основу разработанных схемных решений гибридной энергосистемы предлагается технологическая схема опытно-промышленного образца гибридной системы мощностью 30 кВт. Рассмотрены 4 возможных варианта взаимодействия энергетических установок в гибридной системе. Топливный элемент и газовая микротурбина взаимосвязаны с помощью энергетических потоков (пар, тепло, топливо, электроэнергия). Предлагаемая опытно-промышленная установка является прототипом гибридной системы «мегаваттного» класса. Гибридная энергосистема большой мощности может выступать в роли самостоятельного объекта генерации, заменяющего традиционные энергоустановки ТЭС.

В **четвертой главе** представлена цифровая модель электрохимических и тепло-массообменных процессов в ТОТЭ на базе коммерческого программного пакета Ansys Fluent и технический расчет гибридной энергосистемы на газовых отходах нефтепереработки. По результатам цифрового моделирования прогнозируемая зависимость плотности тока от напряжения для построенной 3D-модели показала приемлемую точность с данными, полученными от производителя с коэффициентом корреляции 0,998. Были построены вольт-амперные и ватт-амперные характеристики для трех видов топлива (водород, метан, синтез-газ из отходов нефтепереработки). Даны результаты анализа термодинамических и электрических характеристик работы ТОТЭ на

синтетическом газе в сравнении с водородным топливом, как с эталонным. По результатам исследования показано, что наибольшую электрическую эффективность можно получить при работе ТОТЭ на водороде. Синтетический газ, полученный риформингом промышленных отходов, показывает также хорошие результаты по производительности, расходу топлива, коэффициенту использования реагентов в связи с высоким содержанием в нем водорода, метана и угарного газа. Для гибридной энергосистемы проведен технический расчет теплового баланса массовых потоков энергоустановок, рассчитаны расходы пара, топлива, воздуха, а также содержание компонентов в выходных газах.

В **выводах** сформулированы основные результаты работы, рекомендации по их применению и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Содержание автореферата в сжатом виде полностью отражает основное содержание диссертации.

#### **Соответствие тематики и содержания работы выбранной специальности**

Тема диссертации и результаты исследований соответствуют пп. 1, 3, 5, 6 паспорта научной специальности 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы».

#### **Личный вклад автора**

Автором лично проведен анализ научно-технической литературы, по результатам которого были выявлены направления, определяющие цель и задачи исследования. Автор провел лабораторные исследования с использованием физико-химических методов анализа газовых отходов нефтепереработки, а также экспериментальные исследования разработанных материалов для адсорбции по десульфуризации топливного газа и декарбонизации процесса энергетического производства в гибридной системе с топливным элементом. Автором построены цифровые модели процессов в топливной ячейке с использованием программного обеспечения для инженерного анализа и выполнил сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными. Автором разработаны технологические схемы и конструкции гибридных систем с топливным элементом. Автор лично проводил промышленные испытания на объектах энергетики. Заключительные положения и рекомендации были сформированы автором по полученным теоретическим, экспериментальным и практическим результатам диссертационной работы.

## **Замечания и вопросы по диссертации**

1 В главе 2 указано, что при проведении экспериментов по улавливанию  $\text{CO}_2$  в лабораторной установке использовался чистый углекислый газ, тогда как в реальных условиях это смесь газов с относительно небольшой долей  $\text{CO}_2$ . Эффективность зависит от концентрации, чем меньше  $\text{CO}_2$  в потоке, тем хуже. Правильней было бы подавать модельный газ.

2 В целом, описание экспериментов очень скупое. Хорошо бы дать сравнение с результатами других исследований. Рекомендуется применять гидроксид натрия, тогда как в большинстве промышленных установок, работающих уже более 50 лет, используют МЭА. Это требует пояснений

3 - В табл. 2 Приложения 4 КПД ГТУ 15,9 %, а табл. 4.3 электрический КПД 24,9%. Как так получается, ведь отношение мощности ТОВЭ к ГТУ, как 1 к 29. Даже если КПД ТОВЭ 100 %, то общий будет 18,7%. Следовало бы подробнее обосновать пик суммарного КПД установки (рис. 4.17) при постоянной мощности газовой турбины с ростом мощности ТОВЭ.

4 Нет достаточных пояснений к расчету общего КПД системы. Уж очень он велик, в варианте 2 теряется всего 1,7 %. По-моему, даже простые тепловые потери на аппаратах будут больше.

5 Экономика очень слабая. Как определяются операционные затраты? Откуда взяты капитальные затраты? Каков коэффициент использования установленной мощности? Следует иметь в виду, что капитальные затраты по крайней мере в 2 раза больше затрат на оборудование (это ведь и строительство, монтаж, пуск и так далее).

6 Имеется ряд неточностей и ошибок в тексте диссертации, по моему мнению, в разделе 1.3 излишне большая вступительная часть, есть повторы, декарбонизация в разделе подготовки топлива (п. 1.3.3), а это очистка газов в основном после МГТ.

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень работы.

## **Заключение**

Диссертация Печенкина А. В. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены новые знания о процессах и схемах утилизации водородосодержащих отходов нефтепереработки в гибридной энергосистеме с высокотемпературным топливным элементом. Они могут быть использованы для прогнозирования рабочих параметров гибридной электрохимической - механической системы с целью более эффективной генерации энергии. Самостоятельно полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация

обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Основные идеи работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. 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

Заведующий лабораторией  
специальных котлов отделения  
парогенераторов и топочных  
устройств, д.т.н.,  
старший научный сотрудник

Рябов Георгий Александрович  
«03» ноября 2023 г.

Почтовый адрес:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),  
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14,  
Тел.: 8 (495) 234-76-30; 8 (495) 234-76-17,  
E-mail: [vti@vti.ru](mailto:vti@vti.ru)  
Сайт: <http://vti.ru>

Подпись Рябова Г.А. удостоверяю:  
Руководитель отдела  
по управлению персоналом ОАО «ВТИ»



Новичкова Н. В.