

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное**  
**бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Саратовский государственный**  
**технический университет**  
**имени Гагарина Ю.А.»**  
**(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке и  
инновациям  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.,  
д.х.н., профессор  
И.Г. Остроумов

ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054  
Телефоны: (8452) 99-88-11;  
факс (8452) 99-88-10;  
(8452) 99-86-03; факс (8452) 99-86-04  
E-mail: sstu\_office@sstu.ru

« 03 » 07 2023 г.

*03.07.2023 № 04/54-2215*  
На № *9023/15 от 19.06.23.*

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу

Марьина Георгия Евгеньевича

**«Прогнозирование энергетических характеристик оборудования ТЭС при  
работе на топливном газе различного компонентного состава»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Для отзыва представлены автореферат и диссертация, состоящая из введения, основной части (5 глав), заключения и списка литературы (174 источника). Работа изложена на 247 страницах машинописного текста, включает 66 рисунков и 23 таблицы.

### **1. Актуальность темы диссертационной работы**

Перспективное развитие энергетики ориентировано на повышение эффективности, надежности, обеспечение экологической чистоты и углеродной нейтральности.

Важнейшей задачей функционирования энергосистемы является надежное и бесперебойное снабжение электрической и тепловой энергией. Модернизация и замена устаревшего оборудования тепловых электрических станций на современные газотурбинные и парогазовые установки является мировым трендом. Газотурбинные установки в качестве топлива используют природный газ, но в камере сгорания можно сжигать топливо различного компонентного состава. Применение альтернативных видов топлива является

перспективным направлением. Одной из важнейших проблем при переходе на альтернативные виды топлива является определение энергетических характеристик двигателя, а также перенастройка автоматического регулирования оборудования электрических станций.

В связи с вышеизложенным, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

**Целью диссертационной работы** оценка степени влияния смеси природного газа и водородного топлива на технические, энергетические характеристики энергетической газотурбиной установки в составе тепловой электрической станции.

## **2. Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства**

Тема диссертационной работы соответствует:

- приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика;
- приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России: энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива;
- критическим технологиям: технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе.

## **3. Новизна результатов исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В представленной диссертационной работе представлены следующие новые научные результаты.

1. Разработана усовершенствованная математическая модель, позволяющая производить оценку изменений рабочих параметров ГТУ, включая систему топливоподготовки с учетом термодинамических параметров топливного газа различного компонентного состава, в том числе с добавлением водорода.
2. Впервые разработана математическая модель рабочих процессов проточной части энергетической газотурбинной установки на примере General Electric 6FA.

## **4. Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов**

Значимость работы для науки заключается в следующем:

1. Определены показатели эффективности газотурбинной установки при работе на различных топливных газах и при добавлении к природному газу водородного топлива, что позволяет производить тепловой расчет не только для эксплуатируемых газотурбинных

установок, но и для проектируемых энергетических газотурбинных установок, работающих на топливных газах различного состава.

2. Разработаны рекомендации по созданию систем подготовки и сжигания топливного газа различного компонентного состава на тепловой электрической станции с газотурбинной установкой General Electric 6FA без внесения изменений в конструкцию, которые могут быть использованы на предприятиях энергетической отрасли для повышения эффективности работы эксплуатируемых газотурбинных установок.

Результаты исследования используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 13.03.03 Энергетическое машиностроение, а также при организации научно-исследовательской работы магистрантов и аспирантов.

## **5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы для определения основных энергетических характеристик (эффективный КПД, мгновенный расход, генерируемая мощность, состав отработавших газов), оптимального режима работы газовой турбины в составе тепловой электрической станции и при проектировании новых газотурбинных установок.

## **6. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования газотурбинных двигателей, согласованием результатов расчетов по разработанным математическим моделям с данными суточного контроля рабочих параметров парогазовой установки действующей станции, а также апробацией полученных результатов и их сопоставлением с известными данными, приведенными в научной литературе.

## **7. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и рекомендаций, списка условных обозначений и сокращений и списка использованной литературы. Общий объем составляет 247 страниц, включая 66 рисунков и 23 таблицы. Список использованной литературы состоит из 174 наименований российских и иностранных источников.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, представлены цели и задачи работы, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора, приведена апробация результатов.



**В первой главе** анализируется проблема недовыработки электроэнергии при изменении состава топлива, топливоподготовки энергетических газовых турбин. Выявлены основные проблемы, возникающие при сжигании топливных газов. Рассмотрены программные комплексы (Gasturb, DVIg, АС ГРЭТ), позволяющие рассчитывать термодинамические свойства рабочих тел.

**Во второй главе** представлена методика расчета термодинамических параметров рабочего тела разного компонентного состава. Приведен алгоритм, позволяющий с высокой точностью определить термодинамические параметры рабочего тела. Окислителем в разработанной методике является атмосферный воздух, рабочим телом в проточной части газовой турбин могут быть как индивидуальные вещества, так и смеси нескольких компонентов. В процессе обработки входных данных топлив используется информационная система, на вход которой поступают данные о термодинамических свойствах индивидуальных веществ, а на выходе пользователь получает условную формулу топливного газа.

**В третьей главе** представлена идентификация и верификация математической модели газотурбинного двигателя с учетом методики получения компонентного состава топливного газа. Энергетические газотурбинные установки работают на оптовом рынке электроэнергии и чаще всего в составе парогазовых энергоблоков, поэтому постоянное поддержание выходных характеристик необходимо для надежного режима работы. Сохранение выходных характеристик (электрическая мощность, расход и тепловая мощность выхлопных газов, температура отработавших газов) являются важными факторами при использовании топливного газа различного состава. С применением разработанного алгоритма определения термодинамических свойств рабочего тела в системе АС "Газодинамический расчет энергетических турбомашин" реализовано моделирование процесса горения, расчет процессов сжатия и расширения.

**Четвертая глава** посвящена исследованию работы газовой турбины на различных топливных газах в диапазоне нагрузок от 25 до 85 МВт. Система нелинейных уравнений для математической модели газотурбинной установки General Electric 6FA. Представлены результаты, полученные с использованием математической модели: а) данные расчета газотурбинной установки General Electric 6FA при базовой нагрузке; б) данные расчета газотурбинной установки General Electric 6FA при переменной нагрузке.

Проведена идентификация на переменных режимах работы газотурбинной установки General Electric 6FA. В результате проведенной идентификации газотурбинной установки получены режимные характеристики.

**В пятой главе** выполнено расчетное исследование влияния различного компонентного состава топливного газа на параметры газовой турбины. Проведено исследование

изменения состава топливного газа одного месторождения. Данное исследование позволяет прогнозировать изменение состава ТЭП газотурбинной установки. В течение времени изменяется состав газа, появляются примеси и происходит снижение генерируемой мощности газовой турбины. Ухудшение энергетических свойств топливного газа приводит к увеличению его расхода и увеличению количества CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> в отработавших газах. Выполнено расчетное исследование добавления водорода к природному газу для повышения мощности стационарной ГТУ в составе оборудования ТЭС.

Представлены показатели экономической эффективности - чистый дисконтированный доход, дисконтированный срок окупаемости, внутренняя норма доходности. Анализ указанных показателей позволяет принять решение о целесообразности сооружения энергетического объекта.

В заключительной части сформулированы **основные результаты и выводы** диссертационной работы, представлены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Оформление диссертации полностью соответствует нормативным требованиям. Изложение материала грамотное и логичное, сделанные выводы обоснованы.

Диссертация соответствует специальности 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».

**При обсуждении диссертационной работы Марьина Г.Е. были высказаны следующие замечания и вопросы.**

1. Работа газотурбинных установок осуществляется не только при переменной электрической мощности, но и при изменении температуры наружного воздуха, оказывающего влияние на ее расходные и энергетические характеристики. Однако, в диссертации исследования проведены при температуре наружного воздуха  $+15^{\circ}\text{C}$ , что несколько снижает ценность полученных результатов.
2. Использование в газотурбинных установках природного газа различного состава оказывает влияние на образование вредных компонентов продуктов сгорания. В диссертации не показано, какими мероприятиями возможно подавление выбросов вредных веществ.
3. На рис. 5.7 (стр. 148) диссертации приведенная зависимость для синтез-газа не соответствуют подрисуночным выводам.
4. В диссертации не показано, в какой части суточного графика электрической нагрузки предполагается работа ПГУ на метано-водородном топливе и какова продолжительность работы ПГУ в режиме с подмешиванием водорода?
5. Из текста работы неясно, учитывался ли эффект от экономии природного газа при подмешивании водорода к природному газу в расчетах экономических показателей и от реализации электролизного кислорода потребителям?
6. В настоящее время в мире КПД усовершенствованной технологии щелочного электролиза немного превышает 80%. Автору следовало учесть это в оценке производства водорода.
7. Емкости, рассчитанные на давление аккумулирования водорода 80-90 МПа как правило небольшого объема, что полностью противоречит утверждению автора на стр. 162 диссертации. В связи с чем выбрано такое высокое давление? В таком случае какой смысл в использовании дожимного компрессора 11 на рис.5.17 диссертации при подаче водорода из системы хранения на смешение с природным газом?
8. В целях безопасности целесообразно предусмотреть удаленное расположение водородного комплекса от предполагаемой ПГУ.

#### **8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

По структуре и содержанию автореферат полностью соответствует основным положениям диссертации и требованиям ВАК Минобрнауки России.



## **9. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

Основное содержание работы изложено в 33 публикациях, в том числе в 10 статьях в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus и Web of Science, в 7 статьях в журналах из перечня ВАК (специальность 2.4.5), в 16 – в материалах всероссийских и международных конференций.

Апробация работы проведена на следующих научных мероприятиях: «Гинчуриные чтения» (г. Казань, 2017-2022г.г.); XIII, IX, XII Международных научно-технических конференциях «Энергия» (г. Иваново, 2018, 2019, 2021г.г.); Всероссийских специализированных научно-практических конференциях молодых специалистов «Современные технологии в энергетике» (г. Москва 2018-2021г.г.); Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2019» (г. Иркутск, 2019г.); Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2020» (г. Ставрополь, 2020г.); 92-м заседании Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко (г. Казань, 2020г.), Международном симпозиуме «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение -2021: SUSE 2021» (г. Казань, 2021г.); Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва 2021г.), Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям «ICAM» (г. Москва 2021г.)

## **10. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Несмотря на изложенные выше замечания диссертационная работа Марьина Георгия Евгеньевича «Прогнозирование энергетических характеристик оборудования ТЭС при работе на топливном газе различного компонентного состава» является завершённой научно-квалификационной работой. Поставленные в диссертационной работе задачи решены, цель работы достигнута. Выводы и рекомендации обоснованы применением опробованных расчетных методик и методов математического моделирования. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для повышения эффективности функционирования энергетических систем за счет использования альтернативных видов топлива. *Теоретические результаты могут найти применение на предприятиях топливно-энергетического комплекса при переходе на альтернативные топлива (водород, метан, синтез-газ).* Представленная к защите диссертация отвечает требованиям п.9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 20 сентября 2013 г. №842 (в

актуальной редакции), а ее автор – Марьин Георгий Евгеньевич заслуживает присуждения научной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Диссертация, автореферат и отзыв обсуждены на заседании кафедры «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрющенко Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., протокол № 37 от 30 июня 2023 г.

Отзыв составили:

Д.т.н., профессор каф. ТАЭ

Николаев Ю.Е.

Д.т.н., доцент каф. ТАЭ

Байрамов А.Н.

Д.т.н., профессор каф. ПТ

Кулешов О.Ю.

Зав. кафедрой ТАЭ, к.т.н., доцент

Соколов А.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

телефон: +7 (8452) 99-87-55, e-mail: [energy@bk.ru](mailto:energy@bk.ru)

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации на диссертацию

Остроумов Игорь Геннадьевич

проректор по науке и инновациям, доктор химических наук, профессор

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

телефон: +7 (8452) 99-88-11, факс 99-88-10, e-mail: [sstu\\_office@sstu.ru](mailto:sstu_office@sstu.ru), сайт :

<https://www.sstu.ru>