

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке  
и коммерциализации  
Ившин И.В.

22.02.2023 г.

Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Казанский государственный энергетический  
университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Диссертация «Прогнозирование энергетических характеристик оборудования ТЭС при работе на топливном газе различного компонентного состава» выполнена на кафедре «Энергетическое машиностроение» в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

В 2009 году Марьин Георгий Евгеньевич закончил бакалавриат ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки «Теплоэнергетика»

В 2011 году с отличием окончил магистратуру ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки «Теплоэнергетика».

В 2015 году окончил очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». Документ о сдаче кандидатских

экзаменов выданы в 2023 году ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». Научный руководитель - кандидат технических наук, Александр Вячеславович Титов, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

По итогам обсуждения диссертации Марьина Георгия Евгеньевича «Прогнозирование энергетических характеристик оборудования ТЭС при работе на топливном газе различного компонентного состава» принято следующее заключение.

### **1.Актуальность**

Важнейшей задачей функционирования энергосистемы является надежное и бесперебойное снабжение электрической и тепловой энергией. Модернизация и замена устаревшего оборудования на современные газотурбинные и парогазовые установки мировой тренд. Газотурбинные установки в качестве топлива используют природный газ, но в камере сгорания можно сжигать топливо различного компонентного состава. Применение альтернативных топлив для газовых турбин является перспективным направлением. Одной из важнейших проблем при переходе на альтернативные топлива является определение энергетических и экологических характеристик двигателя, а также перенастройка автоматического регулирования ГТУ.

В качестве газообразного топлива в ГТУ используется природный газ, состав и энергетические свойства которого зависят от места добычи. Некоторые показатели природных газов могут измениться в небольших пределах от времени эксплуатации скважин (источников). При работе газовой турбины существует большое количество факторов, которые оказывают влияние на срок службы, эксплуатационные и маневренные характеристики турбины. Использование различных видов топлив и переход к новым искусственным топливам для газовых турбин требует



качественного анализа компонентного состава топливного газа, так как разный состав оказывает влияние не только на энергетические характеристики, но и на режим работы основного и вспомогательного оборудования, а также изменяется состав отработавших газов.

Актуальность темы диссертации подтверждается ее соответствием направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации Н2 «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии», приоритетному направлению развития науки, технологии и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утв. Указом Президента РФ от 07.07.2015 №899), критической «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», указом Президента РФ от 4.10.2020г. №666 «О сокращении выбросов парниковых газов», стратегии «Социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года», в частности использование водородного топлива для снижения вредных выбросов(утв. распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021г. №3052р).

По мере развития технологий и ужесточения требований по количеству выбросов энергетического оборудования, для систем подготовки и сжигания топливного газа стали появляться ограничения по физическим и химическим свойствам используемого топлива для эффективного, безопасного и экологичного сжигания топливного газа. Анализ работы газотурбинных установок , моделирование работы парогазовых установок были проведены Мошкариным А.В., Аракеляном Э.К., Бурцевым С.В., Аминовым Р.З. Шелыгиным Б.Л. Цаневым С.В., Булысовой Л.А., Тумановским А.Г., Буровым В.Д., Kotowicz, J., Madhlopa, A. Оценка работы газовых турбин на различных составах топливного газа были проведены

Горюновым И.М., Алемасовым В.Е., Трусовым Б.Г., Тунаковым А.П., Гурвичем А.В., Ахмедзяновым Д.А., Мингазовым Б.Г., Zheng, L., Ling, C., Ubogu, E.A., Cronly, J., Ahmed, I., Zhang, Y., Khandelwal, Esclapez, L., Ma, P.C., Mayhew E. Однако не смотря на известные разработки, не проводилась оценка эффективности использования смеси водородного топлива и природного газа на энергетических установках тепловых электрических станций, что является актуальной научно-технической задачей.

## **2. Научная новизна результатов работы**

Научная новизна характеризуется тем, что были получены следующие 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.

## **3. Научная и практическая значимость результатов**

**Теоретическая значимость.** Полученная модель и алгоритм определения компонентного состава топливного газа могут быть использованы для определения основных энергетических характеристик (удельный расход, эффективный КПД, мгновенный расход, генерируемая мощность, состав отработавших газов), оптимального режима работы газовой турбины и при проектировании новых газотурбинных установок.

## **Практическая значимость**

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.

## **4. Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации**

Автором определены перспективы перехода газотурбинных установок на альтернативные виды топлива. Разработана математическая модель газовой турбины, определены оптимальные режимы работы, при работе на топливах различного компонентного состава. Разработана методика, обеспечивающая расчет термодинамических свойств рабочего тела произвольного состава.

Автор принимал участие в обсуждении результатов, написании статей и представлении докладов на конференциях.

## **5. Степень достоверности результатов проведенных исследований**

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.

## **6. Соответствие диссертации научной деятельности**

Диссертация соответствует специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы и относится к следующим областям исследований:

- 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».

## **7. Полнота изложений результатов диссертации в работах, опубликованных автором**

По результатам выполненных исследований опубликовано 33 научные работы, из них 7 статей, входящих в перечень ВАК (в изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации), 10 статей, включенных в базы данных SCOPUS, 16 материалов всероссийских и международных конференций.

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации:*

1. Марьин Г. Е. Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы / Г. Е. Марьин, Б. М. Осипов // Вестник Иркутского Гос.Техн.Ун-т. – 2020. – Т. 24. – № 2(151). – С. 356-365 (вклад соискателя – 80%).

2. Марьин Г. Е. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки / Г. Е. Марьин, Б. М. Осипов, П. Зунино, Д. И. Менделеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 5. – С. 41-51 (вклад соискателя – 50%).

3. Менделеев Д. И. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках / Д. И. Менделеев, Г. Е. Марьин, А. Р. Ахметшин // Вестник Казан.Гос.Энерг.Ун-т. – 2019. – Т. 11. – № 3(43). – С. 47-56 (вклад соискателя – 60%).

4. Марьин Г. Е. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок / Г. Е. Марьин, Б. М. Осипов, А. Р. Ахметшин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 2. – С. 84-92 (вклад соискателя – 60%).

5. Марьин Г. Е. Добавление водорода к топливному газу для повышения энергетических характеристик газотурбинных установок / Г. Е.

Марьин, Б. М. Осипов, А. Р. Ахметшин, М. В. Савина // Вестник Иркутского Гос. Техн. Ун-та. – 2021. – Т. 25. – № 3(158). – С. 342-355 (вклад соискателя – 50%).

6. Марьин Г. Е. Влияние водородного топлива на работу газотурбинной установки при работе на оптовом рынке электрической энергии и мощности / Г. Е. Марьин, Б. М. Осипов, А. Р. Ахметшин, А. Н. Горлов // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 1. – С. 17-26. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-82-1-17-26 (вклад соискателя - 50%).

7. Марьин Г. Е. Газовая турбина, работающая в составе тепловой электрической станции с водородным накопителем / Г. Е. Марьин, Б. М. Осипов, А. В. Титов, А. Р. Ахметшин // Альтернативная энергетика и экология – 2023. – № 1 – С. 23-35. – DOI 10.15518 (вклад соискателя - 50%).

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS и Web of Science:*

8. Marin G. E. Research on the influence of fuel gas on energy characteristics of a gas turbine / G. E. Marin, B. M. Osipov, D. I. Mendeleev // E3S Web of Conferences Kazan: EDP Sciences, 2019. – P. 05063. – DOI 10.1051/e3sconf/201912405063 (вклад соискателя – 60%).

9. D. I. Mendeleev Study of the work and efficiency improvement of combined-cycle gas turbine plants / D. I. Mendeleev, Y. Y. Galitskii, G. E. Marin, A. R. Akhmetshin // E3S Web of Conferences : Kazan: EDP Sciences, 2019. – P. 05061. – DOI 10.1051/e3sconf/ 201912405061.

10. Marin G. E. Analysis of Changes in the Thermophysical Parameters of the Gas Turbine Unit Working Fluid Depending on the Fuel Gas Composition / G. E. Marin, D. I. Mendeleev, A. R. Akhmetshin // Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934021. – DOI 0.1109/FarEastCon.2019. 8934021 (вклад соискателя – 50%).

11. Marin G. Study of the operation of a 110 MW combined-cycle power



unit at minimum loads when operating on the wholesale electricity market / G. Marin, D. Mendeleev, B. Osipov // E3S Web of Conferences RSES 2020 Kazan : EDP Sciences, 2020. – P. 01077 (вклад соискателя – 60%).

12. Marin, G Supply of additional working fluid to the flow part of the NK-8 gas turbine engine / G. Marin, D. Mendeleev, B. Osipov, A. Akhmetshin // E3S Web of Conferences, Prague, 2020. – P. 01038 (вклад соискателя – 60%).

13. Marin G Study of the effect of fuel temperature on gas turbine performance / G. Marin, D. Mendeleev, B. Osipov, A. Akhmetshin // E3S Web of Conferences, Prague, 2020. – P. 01033. – DOI 10.1051/e3sconf/202017801033 (вклад соискателя – 60%).

14. Marin G. E. A study on the operation of a gas turbine unit using hydrogen as fuel / G. E. Marin, D. I. Mendeleev, B. M. Osipov // Journal of Physics: Conference Series, Moscow, 2021. – P. 012055 (вклад соискателя – 60%).

15. Mendeleev D. I. Study of the work and efficiency improvement of combined-cycle gas turbine plants/ D. I. Mendeleev, Y. Y. Galitskii, Marin G. E. , A. R. Akhmetshin – P. 05061. – DOI 10.1051/e3sconf/201912405061(вклад соискателя – 60%).

16. Marin G. E. Improving the Performance of Power Plants with Gas Turbine Units/ Osipov B.M., Titov A.V., Akhmetshin A.R., Shubina A.S., Novoselova M.V.// 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2022, Publisher: IEEE, art. no. 9974004, DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974004 (вклад соискателя – 50%).

17. Marin G. E. Simulation of the operation of a gas turbine installation of a thermal power plant with a hydrogen fuel production system/ B.M.Osipov A.V.Titov A.R.Akhmetshin// International Journal of Hydrogen Energy. Volume 48, issue 12, 8 february 2023, pages 4543-4550 (вклад соискателя – 50%).

## 8. Апробация работ

Результаты научных исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на:

- Международной Молодежной Научной Конференции «Тинчуринские чтения» г. Казань, 2017,2018,2019,2020,2021,2022;
- Международной Научно-Технической Конференции «ЭНЕРГИЯ-2018,2019,2021», г. Иваново, 2018,
- II Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в энергетике», 2018,2019,2020,2021 Москва,
- Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2019» г. Иркутск,
- Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2020» г. Ставрополь,
- HSTED 2020 14-15 мая 2020,
- 92-м заседании Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. г. Казань 2020,
- Международный симпозиум «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение -2021: SUSE 2021» г. Казань,
- Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов радиоэлектроника, электротехника и энергетика 2021г., г. Москва,
- Международной научно-технической конференция по авиационным двигателям ICAM г. Москва 2021.

## 9. Ценность научных работ соискателя

Ценность научных работ соискателя состоит в проведении исследований, результаты которых направлены на оптимизацию режимов работы энергетического оборудования тепловой электрической станции при переходе на альтернативные виды топливного газа. По результатам



проведенных исследований усовершенствована математическая модель расчета термодинамических параметров топливного газа различного компонентного состава применительно к газотурбинной установке в составе тепловой электрической станции, позволяющая прогнозировать параметры оборудования.

## **10. Характер результатов**

Характер результатов диссертации соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ.

## **11. Выводы**

Диссертация «Прогнозирование энергетических характеристик оборудования ТЭС при работе на топливном газе различного компонентного состава» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задач, связанных с переходом на альтернативные топливные газы энергетического оборудования ТЭС.

Полученные результаты направлены на прогнозирование энергетических характеристик газотурбинных установок и могут быть использованы на предприятиях энергетической отрасли для повышения эффективности работы эксплуатируемых газотурбинных установок.

Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Работа соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, принятого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. №335, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени

кандидата наук, включая требования п.14.

Диссертация «Прогнозирование энергетических характеристик оборудования ТЭС при работе на топливном газе различного компонентного состава» Марьина Георгия Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 -Энергетические системы и комплексы.

Заключение принято на заседании кафедры «Энергетическое машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Присутствовало на заседании 10чел. Результаты голосования: «за»— 10чел., «против»—0чел., «воздержалось»—0чел., протокол №9 от «21» февраля 2023г.

Председатель заседания:

Мингалеева Гузель Рашидовна,

Докт.техн.наук, доцент, заведующий кафедрой

«Энергетическое машиностроение»

ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.  
Тел.(843)519-43-17,e-mail:kafedraems@yandex.ru

Ившин Игорь Владимирович: доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», проректор по науке и коммерциализации  
4200066Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.  
Тел.(843)519-43-55,e-mail:[ivshin.IV@kgeu.ru](mailto:ivshin.IV@kgeu.ru)



*Мингалеева Г.Р.*  
ПОДПИСЬ И ПЛОТОВАЯ КОПИЯ  
Специалист ОК *Рабибрахманова О.А.*