

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Филиппова Прокопия Степановича

«Влияние способов управления теплофизическими параметрами рабочего тела на энергетические показатели газотурбинного цикла ПГУ на искусственном газовом топливе» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Филиппова П.С. посвящена исследованию способов управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовых турбин на искусственных газах, с учетом их работы в составе парогазовых установок.

В большом количестве энергетических систем различных государств, в том числе в Российской Федерации, все актуальнее становится диверсификация генерирующих мощностей на различных типах ископаемого топлива, а также многообразие подходов на принципах возобновляемой энергетики. При этом существенное внимание уделяется технологиям использования твердых топлив на фоне повышения конкуренции на рынках природного газа. Наряду с современными трендами развития пылеугольных энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами, все большее энергетическое пространство завоевывают парогазовые установки на искусственном газовом топливе, получаемом либо в процессе внутрицикловой газификации, либо поставляемом в качестве побочного продукта ряда технологий. Ключевым фактором при разработке подобных энергетических систем, помимо чисто экономических показателей, является требование высокой экологичности, в числе которых не только снижение выбросов окислов азота, серы, углерода, но и эмиссии углекислого газа (прямым следствием повышения эффективности сжигания), что является требованием международных норм, определяемых, в частности, Парижским Соглашением. Весьма эффективными с

экологических позиций направлениями являются системы с повышенным содержанием водорода в газовом топливе и кислорода в окислителе. Таким образом, тема диссертации, ее цели и задачи являются в высокой степени **актуальными**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы и раздела с приложениями.

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов, описана структура диссертации и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу литературных данных по теме диссертации. Проведено сравнение характеристик работающих парогазовых установок, использующих стандартные газовые турбины с воздушным или кислородным окислителем, показаны наиболее часто используемые способы повышения эффективности ГТУ при переходе с природного на искусственные газы, сводящиеся к двум типам: калорические и термические. Выполнен анализ способов унификации параметров топливного газа, модификации параметров окислителя, оптимизации температур газа и воздуха перед сжиганием, а также наиболее часто реализующихся режимов горения.

Во **второй главе** приведена методика экспериментальных исследований, использованных в работе, конструкция созданной экспериментальной установки. Описана методика определения влияния температуры окислителя (воздуха) на механизм горения окиси углерода с целью изучения режимов воспламенения и погасания диффузионного факела при горении модельного синтез-газа в предварительно подогретом воздухе, а также получения зависимостей концентрации окислов азота и полноты сгорания модельного синтез-газа от температуры и расхода воздуха. Кратко представлено описание методики численного моделирования процессов в тестовых режимах, используемой для оценки

влияния уровня температур воздуха и газа на состав продуктов сгорания искусственных газов. Описана методика термодинамического исследования влияния теплофизических характеристик рабочего тела на энергетические и экономические показатели термодинамического цикла, а также методика расчета чувствительности удельной работы газовой турбины и газотурбинного цикла в целом к калорическим и термическим способам управления теплофизическими параметрами рабочего тела газовой турбины.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию режимов горения, определению условий воспламенения и погасания, определению зависимостей концентраций термических окислов азота и степени химического недожега от режимных параметров. Автором показана нецелесообразность сжигания концентрированных искусственных газов в высокотемпературном воздушном окислителе, имеющая своим следствием многократное увеличение выбросов окислов азота. Вместе с тем существенно возрастающий при этом запас устойчивости горения по низшей теплоте сгорания может послужить основой применения известных и отработанных технических решений для обеспечения высокоэкологичного сжигания низкокалорийных искусственных газов.

В весьма лаконичной **четвертой главе** приведены результаты численного исследования образования окислов азота в режимах «мокрой» коррекции (впрыск пара) и «сухой» коррекции (подача азота). Автором показано, что сочетание этих методов позволяет в ряде режимов существенно снизить выбросы окислов азота при сохранении приемлемого порога потухания факела.

Пятая глава посвящена термодинамическому анализу влияния калорических и термодинамических способов управления теплофизическими параметрами рабочего тела и их влиянию на характеристики газотурбинного цикла Брайтона. Термодинамический анализ выполнен для рабочих тел разного состава. Автором проведено сравнение эффективности варьирования параметров рабочего тела и их

влияния на удельную работу газовой турбины. Проанализирована эффективность повышения энергетических и экономических показателей газовой турбины за счет разработанных и применяемых на практике способов коррекции теплофизических параметров рабочего тела.

К содержанию и изложению работы можно сделать следующие **замечания:**

1. Использованная экспериментальная методика не позволяет однозначно связать события воспламенения\погасания с гидродинамической структурой потока, что могло бы существенно расширить возможности управления этими процессами при помощи различных активных и пассивных методов. В диссертации не приведено ни одного результата по гидродинамической структуре потока, полученного при помощи метода PIV, хотя этот метод упоминается, как используемый в работе. Описание измерительной системы в Приложении 13 не содержит информации о конкретных параметрах, использованных при измерениях, а это является существенным.

2. Чрезмерно кратко приведено описание используемых математических моделей и подходов, в частности, при моделировании процессов образования и разложения окислов азота. По выбору отдельных моделей приведены ссылки на различные литературные источники, однако не обосновано их совместное применение. Не ясно, что вкладывается в понятие «стандартная модель горения H_2 и CO ». Не указано, какой конкретно CFD пакет для моделирования гидродинамики, теплообмена и горения использовался в работе. Как и в случае экспериментального исследования, результаты по гидродинамической структуре, температурным и концентрационным полям, за исключением интегральных значений «выхода NO_x », также остались за рамками изложения.

3. В работе не рассматривается зависимость удельной теплоемкости от температуры. Считается ли, что данный эффект является незначительным?

4. Интересные результаты получены по влиянию содержания аммиака на концентрацию NOx в продуктах горения. К сожалению, результаты ограничены лишь двумя значениями концентрации NH₃.

5. Выражение на странице 101 «...на выбросы NOx из камеры сгорания ГТУ на искусственном газе основное влияние оказывает температура горения газа, тогда как влияние рабочего давления незначительна» может создать ложное впечатление о том, что влияние давления на соотношение между временем пребывания в камере сгорания и характерные времена окисления топлива и азота является незначительным.

6. Автором не вполне обоснованно в тексте диссертационной работы употребляется термин «экономическая эффективность». Отчасти повышение КПД термодинамического цикла ГТУ можно отнести к экономическим показателям. Вместе с тем в полной мере об экономической эффективности можно говорить только в контексте более полного анализа, учитывающего стоимостные и энергетические затраты на обогащение топлива, термическую подготовку и т.д.

7. Автором в тексте используется различная терминология для характеристики соотношения топливо-окислитель: «коэффициент избытка воздуха», а также термины «коэффициент эквивалентности» и «эквивалентное отношение», являющиеся вариантами перевода англоязычного определения «коэффициента избытка топлива». Не являющееся существенным, данное замечание следует расценивать как пожелание в будущем использовать единые терминологические подходы.

8. В тексте имеются неточные выражения и опечатки:

В Таблице 1.3 не указаны единицы измерения расхода топлива

Стр. 10: «модельных искусственного»

Стр. 33: вместо «Росси» должно быть «России»

Стр. 61: «Целью исследования является:» - корректно сформулировать «Целями исследования являются:»

Стр. 67: «Расчет ...представлены»

Стр. 103: «на рис. 3.1 представлена кривые»

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокую научную ценность данной диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку. Диссертация Филиппова П.С. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную **практическую значимость**. Результаты исследований имеют высокую степень **научной новизны и достоверности**. Выводы работы обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Тема диссертации «Влияние способов управления теплофизическими параметрами рабочего тела на энергетические показатели газотурбинного цикла ПГУ на искусственном газовом топливе» **соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника** (по части **формулы специальности**: «численное и натурное моделирование для изучения теплофизических процессов газообразных средах, в тепловых и энергетических установках»; **области исследований**: «термодинамическое исследование газотурбинного цикла»), так как в диссертации приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований тепло- и массопереноса в газообразных средах, процессов горения газового топлива. **По отрасли наук** диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к работам **на соискание ученой степени кандидата технических наук**, так как направлена на исследование способов повышения энергетических показателей газотурбинных установок.

Результаты диссертационного исследования Филиппова П.С. докладывались на ведущих отечественных научных конференциях в г. Новосибирск, Москва, Екатеринбург, Ялта и опубликованы в журналах, **индексируемых Scopus и Web of Science.**

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации Филиппова П.С. можно сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ.

Считаю, что **Филиппов Прокопий Степанович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Директор ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Маркович Дмитрий Маркович

Адрес:

Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

Тел.: +7(383) 330-90-40

E-mail: director@itp.nsc.ru

Подпись Д.М. Марковича заверяю

Ученый секретарь

(подпись)



16 февраля 2021 г.