

МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»  
(КНИТУ-КАИ)

ул. К.Маркса, д. 10, Казань, 420111  
Тел.: (843) 238-41-10 Факс: (843) 236-60-32  
E-mail: [kai@kai.ru](mailto:kai@kai.ru) <http://www.portal.kai.ru>  
ОКПО 02069616, ОГРН 1021602835275,  
ИНН/КПП 1654003114/165501001

На № 9.06.18 от № 99-1290-1839

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной  
деятельности  
ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,  
д.т.н., профессор  
Михайлов С. А.  
«09» июня 2018 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Казанский  
национальный  
исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»  
на диссертационную работу Хасанова Наримана Гаязовича

«Влияние неидеальности термодинамических свойств рабочих тел на  
процессы в ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

#### Актуальность работы

В диссертационной работе Хасанова Н.Г. рассмотрено влияние неидеальных свойств рабочих тел на величину оптимальной степени повышения давления воздуха в компрессоре ГТУ с промежуточным охлаждением. Выбор оптимальных параметров газотурбинных установок сложных циклов является предметом многочисленных теоретических исследований ввиду перспективности эффективного газотурбинного привода, как в промышленности, так и в энергетике. В предположении подчинения поведения рабочих тел модели идеального газа проблема выбора оптимальной степени повышения давления в ГТУ с промежуточным

охлаждением воздуха изучена полно. Расчёт оптимальной степени повышения давления воздуха с учётом специфики рабочего тела в ГТУ с ПО – сжатия при высоких давлениях и низких температурах, расширением при низких коэффициентах избытка воздуха – задача до конца не решенная. Предложенные модели не учитывают влияние давления на теплоёмкость и энтальпию рабочего тела, влияние удельного объёма на внутреннюю энергию рабочего тела, отличие уравнения состояния идеального газа от уравнения состояния реального газа. К текущему моменту не разработаны модели, позволяющие учесть зависимость адиабатных коэффициентов полезного действия каскадов компрессора с промежуточным охлаждением от их степеней повышения давления.

На этом основании работа Хасанова Н.Г. является актуальной.

Целью диссертационной работы является повышение термического КПД, максимальной полезной мощности, уточнение оптимальной степени повышения давления, за счёт учёта неидеальных свойств рабочих тел ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха.

#### Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 169 наименований. Общий объём диссертации – 179 страниц, включает 107 рисунков, 29 таблиц.

Во введении сформулирована научная новизна работы, её актуальность и значимость.

В первой главе приведено сравнение моделей расчёта адиабатных процессов расширения и сжатия – приближённых и точных для идеального и реального газа. Показано, что имеют место два противоположных подхода – использование реального уравнения адиабаты и состояния, но при постоянной теплоёмкости при выводе уравнения процесса, и обратный подход - интегрировании идеального уравнения адиабаты при переменной теплоёмкости.

Показаны допущения, принимаемые в имеющихся моделях оптимизации степени повышения давления газотурбинных установок с промежуточным охлаждением воздуха. На основе сделанных выводов сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе диссертационного исследования усовершенствован метод расчёта процессов расширения и сжатия рабочего тела по методу конечных элементов. Метод уточнён введением в уравнение элементарного участка процесса коэффициента отклонения по А.М. Розену. Учтено отличие суммы изоэнтропных работ элементарных ступеней процесса от общей



изоэнтропной работы применением формулы, устанавливающей связь между изоэнтропным КПД – общим для процесса и в элементарном участке. Приведено сравнение результатов расчёта в усовершенствованной модели с экспериментальными данными.

В третьей главе диссертационного исследования разработана усовершенствованная модель расчёта оптимальной степени повышения давления в компрессоре ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха.

Проведён обзор рекомендаций по тепловому расчёту ГТУ СПО, параметров действующих установок, для обоснования выбора постоянного коэффициента сопротивления теплообменника-охладителя.

В главе решается двухпараметрическая оптимизационная задача – выбор общей степени повышения давления и степени повышения давления в первом каскаде компрессора, обеспечивающих максимум полезной мощности и термического КПД проектируемой ГТУ с ПО. Удалось избежать применения двух дополнительных вложенных циклов итерации при учёте зависимости теплоёмкости от температуры и давления, изоэнтропных КПД каскадов компрессора от степеней повышения давления, за счёт сведения двухпараметрической оптимизационной задачи к последовательному решению двух одномерных задач.

Проведено сравнение в авторской модели и в модели идеального газа величин оптимальных степеней повышения давления по критериям максимальной полезной мощности и термического КПД. Установлено, что модель идеального газа даёт завышенные значения оптимальных степеней повышения давления при тепловом расчёте. Изучено влияние начальных условий расчёта на величину оптимальной степени повышения давления как общей, так и в первом каскаде компрессора и объяснены наблюдения.

#### Научная новизна работы:

1) Предложен алгоритм, позволяющий определить изоэнтропный КПД каскада многокаскадного компрессора в зависимости от общего изоэнтропного КПД процесса сжатия, соотношения общей и каскадной степени повышения давления. В отличие от ранее предложенных алгоритмов учитывается изменение термодинамических свойств в каскадах после проохладителя.

2) Усовершенствован известный метод расчёта процессов расширения и сжатия газа по малым приращениям давления за счёт учёта влияния удельного объёма на внутреннюю энергию рабочего тела и достоверной оценки необратимости процесса. На этой основе создана математическая



модель оптимизации общей и каскадной степени повышения давления в ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха.

3) Доказано, что применение модели идеального газа при тепловом расчёте приводит к существенно завышенным оптимальным степеням повышения давления, как по критерию максимальной полезной мощности, так и термического КПД. В первую очередь - за счёт неучёта влияния давления на теплоёмкость воздуха. Завышение моделью идеального газа оптимальной степени повышения давления влияет на эксплуатационные свойства проектируемого компрессора.

Практическая и научная значимость работы:

1) Усовершенствованный метод расчёта процесса расширения и сжатия по малым приращениям давления полезен при проектировании энергетических, транспортных, криогенных установок на неидеальных рабочих телах;

2) Алгоритм оценки изоэнтропного КПД каскада многокаскадного компрессора или турбины пригоден при проектировании перспективных ГТУ усложнённых схем;

3) Уточнение этапа теплового расчёта ГТУ с ПО достоверной оценкой оптимальной степени повышения давления позволяет снизить издержки при доводке опытной конструкции для достижения определённых техническим заданием характеристик, повышает эксплуатационные качества спроектированного агрегата;

4) Оценка оптимальной степени повышения давления в зависимости от различных начальных условий показывает перспективы к дальнейшему повышению начальных параметров рабочего тела, возможному с развитием современных конструкционных материалов газотурбинных установок.

Результаты исследования использованы в лекционном курсе дисциплины «Газотурбинные установки» ФГБОУ ВО КГЭУ и внедрены в расчётную практику Казанской ТЭЦ-2 АО «Татэнерго».

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме:

Содержание диссертации соответствует заявленной теме, а также паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а именно пункту 3:

- Исследования термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии.

Содержание автореферата соответствует диссертации.

Основные результаты диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в научной печати.

Личный вклад соискателя

Состоит в проведении литературного обзора, создании математических моделей, выполнении расчётов, анализе полученных результатов

Достоверность полученных результатов

Автор придерживается положений математического анализа и технической термодинамики. Для реализации численных методов использована библиотека FORTRANISML. Результаты оценки работы газа и оптимальной степени повышения давления сравнивались с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, качественно непротиворечивы, не расходятся с физическими представлениями о процессах в ГТУ с ПО.

Имеют место замечания по диссертационной работе:

1) Необходима экономическая оценка эффекта от уточнения модели оценки оптимальной степени повышения давления в компрессоре – каково уменьшение затрат от недовыработки мощности, снижения удельного расхода топлива по сравнению с исходной моделью, которая, как указано в диссертации, приводит к завышению оптимальной степени повышения давления проектируемого агрегата;

2) В выводах по работе не указано, на какую величину в процентах происходит уточнение оптимальной степени повышения давления, термического КПД, полезной мощности объекта исследования. Указано только о качественном изменении, а именно - существенное завышение;

3) Современные конструкторские бюро обладают ресурсами для трёхмерного расчёта процесса течения рабочего тела. Неужели такие высокоуровневые модели не позволяют учесть реальные свойства газов?

4) В диссертации сведения о погрешности вычислений разбросаны по тексту. Необходимо было дать сведения о вкладе каждого этапа вычислений в общую погрешность полученных результатов;

5) При выводе формулы (2.37), устанавливающей связь между изоэнтропным КПД элементарного участка процесса и общим изоэнтропным КПД сжатия необходимо было также ввести коэффициенты отклонения (2.16), либо обосновать, почему это отдельное положение выведено в рамках модели идеального газа.

Замечания не снижают ценности полученных аспирантом результатов.

Заключение



Диссертация Хасанова Наримана Гаязовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача определения оптимальной степени повышения давления в ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха при учёте неидеальных свойств рабочих тел. Результаты исследования обладают теоретической и практической значимостью для развития соответствующей отрасли знания. Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор Хасанов Нариман Гаязович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа доложена соискателем и обсуждена на заседании кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» КНИТУ КАИ, на основании протокола № 13 от 31.05.2018г. составлен настоящий отзыв.

Профессор, д.т.н



Попов И.А.

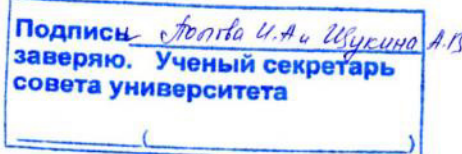
Профессор, д.т.н.



Щукин А.В.

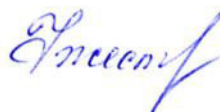
420111, Россия, РТ, г.Казань, ул.К.Маркса, 10.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», тел. +7-843-238-41-10, электронная почта: kai@kai.ru



Подписи заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета  
ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»



Жестовская Ф.А.

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации на диссертацию

Михайлов Сергей Анатольевич, проректор по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,

д.т.н., профессор,

420111, Россия, РТ, г.Казань, ул. К Маркса, 10.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», тел. +7(843)238-91-69, электронная почта: png@kai.ru.