

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Филиппов Прокопий Степанович

**Влияние способов управления теплофизическими параметрами рабочего
тела на энергетические показатели газотурбинного цикла
ПГУ на искусственном газовом топливе**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
РЫЖКОВ Александр Филиппович

Официальные оппоненты: **МАРКОВИЧ Дмитрий Маркович**, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, директор института;

ТУГОВ Андрей Николаевич, доктор технических наук, ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», г. Москва, заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств;

ЩЕКЛЕИН Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»

Защита состоится «05» марта 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.05.12 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1862>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время перед разработчиками перспективных энергоустановок на ископаемом топливе стоят две глобальные задачи: 1) повышение экономичности и экологичности сжигания твердых топлив до уровня перспективных показателей, достигнутых при работе на природном газе; 2) решение проблемы эмиссии антропогенного CO_2 .

Перспективным направлением поиска решения этих задач, наряду с развитием высокоэффективных пылеугольных энергоблоков на суперсверхкритических параметрах, является разработка новых парогазовых установок (ПГУ) на искусственных газовых топливах, которые становятся более экологичными и эффективными по сравнению с пылеугольными энергоблоками.

Ключевым элементом таких ПГУ является газотурбинная установка, рабочее тело которой формируется при сжигании искусственного топливного газа, получаемого путём термохимической конверсии ископаемых топлив в узле внутрицикловой газификации ПГУ, либо побочные продукты металлургической, химической и нефтяной промышленности. В ближнесрочной перспективе в рамках нового в РФ направления водородной энергетики рассматривается работа ГТУ на углеводородном топливе, обогащаемом «желтым», «голубым» или «зеленым» водородом. Для решения первой глобальной задачи применяют обычно стандартные газовые турбины, работающие по открытому циклу, элементы которой модифицируются под сжигание непроектного топлива в воздухе. Для радикального решения второй глобальной задачи разрабатываются новые турбоустановки, работающие по полукрытому циклу со сжиганием в кислороде («*Oxy-fuel*» технологии) новых топливных газов на основе H_2 / CO , получаемых конверсией предыдущих.

Изменение теплофизических характеристик рабочего тела, соответствующее разным составам газов и схемам их сжигания, будет радикальным образом изменять энергетические показатели газотурбинного цикла у энергоустановки в

целом, что должно приводить к корректировке закладываемых в конструкцию оптимальных термодинамических параметров.

Тематика исследования соответствует утвержденным на Федеральном уровне Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п. 08 – Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика) и Перечню критических технологий РФ (п. 27 – Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе).

Степень разработанности проблемы. Автор опирается на труды отечественных ученых: Семенов Н.Н., Зельдович Я.Б., Михельсон В.А., Полежаев Ю.В., Вулис Л.А., Вукалович М.П., Гельтман А.Э., Андрющенко А.И., Костюк А.Г., Фаворский О.Н., Ольховский Г.Г., Трухний А.Д., Буров В.Д. и др. Наряду с отечественными работами диссертант обращается к трудам зарубежных авторов, посвященным разработкам технологий сжигания искусственных газовых топлив в комбинированных парогазовых циклах: *Giuffrida A., Hasegawa T., Meyer H.S., Komori T., Muller M., Allam R., Mathieu P., Oki Y., Kobayashi M., Shirai H.* и др.

Информацию по работе отдельных узлов, технологическим процессам и циклам ПГУ на искусственном газе автор почерпнул в трудах отечественных (ОАО «ВТИ», ОАО «НПО ЦКТИ», ИСЭМ СО РАН, ИТ СО РАН, ОИВТ РАН, МЭИ, МГТУ, ТПУ, СПбПУ, УрФУ и др.) и зарубежных (*NEDO* (Япония), *CRIEPI* (Япония), *Politecnico di Milano* (Италия), *Technische Universitat Munchen* (Германия), *ECUST* (Китай), *CSU* (Китай), *NETL* (США) и др.) организаций и научно-исследовательских центров / институтов.

Объект исследования. Газотурбинный цикл ПГУ на искусственном газе.

Предмет исследования. Повышение энергетических показателей газотурбинного цикла ПГУ на искусственном газе за счет управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины.

Цель. Выявить степень влияния способов управления теплофизическими свойствами рабочего тела газовой турбины на энергетическую эффективность газотурбинного цикла.

Задачи:

1) проанализировать применяемые на практике и перспективные, находящиеся в разработке, калорические (коррекция состава и теплоты сгорания топливного газа) и термические (вариация температурного режима подготовки топливного газа и воздуха) способы управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины ПГУ на искусственных газах;

2) разработать методику и провести экспериментальное исследование влияния термического способа управления теплофизическими характеристиками рабочего тела на особенности горения (режимы погасания и экологичность) модельных искусственных газов на основе СО;

3) подготовить подмодели расчета и провести численные *CFD* исследования влияния термического способа управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины на экологичность сжигания искусственных газов, обобщающие и дополняющие технологии экологичного сжигания искусственных газов применительно к ГТУ;

4) отработать методику и провести термодинамический анализ зависимости оптимальных параметров газотурбинного цикла от теплофизических характеристик рабочего тела и чувствительности показателей работы газовой турбины к калорическим и термическим способам управления теплофизическими свойствами рабочего тела.

Научная новизна:

1) выявлены и проанализированы применяемые на практике и перспективные, находящиеся в разработке, калорические (коррекция состава и теплоты сгорания топливного газа) и термические (вариация температурного режима подготовки топливного газа и воздуха) способы управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины ПГУ на искусственных газах;

2) определено влияние термического способа управления теплофизическими характеристиками рабочего тела на особенности горения модельных искусственных газов на основе СО;

3) получены расчетные оценки влияния термического способа управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины на экологичность сжигания искусственных газов, обобщающие и дополняющие технологии экологичного сжигания искусственных газов применительно к ГТУ;

4) представлен новый подход к оценке эффективности термодинамических циклов ГТУ на различных рабочих телах, позволивший:

- выявить экстремальный характер зависимости между теплофизическими характеристиками рабочего тела и энергетическими показателями газотурбинного цикла ПГУ;

- найти связь между оптимальными теплофизическими характеристиками рабочего тела и термодинамическими параметрами газотурбинного цикла;

- определить чувствительность энергетических показателей газотурбинного цикла ПГУ на искусственном газе к способам управления составом и теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины.

Теоретическая и практическая значимость работы. Основные результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения НИР, финансируемых Российским Научным Фондом (проект №14-19-00524, «Решение проблемы применения бедных промышленных и синтез-газов для выработки электроэнергии в комбинированном цикле», 2014-2016 г.), Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проект №16-38-00479, «Исследование механизмов стабилизации и повышения экологических характеристик процесса горения низкокалорийных синтез-газов применительно к газовой турбине ПГУ с внутрицикловой газификацией», 2016-2017 г.).

Методология и методы исследования. При последовательном сочетании аналитического обзора литературы освоенных и разрабатываемых ПГУ на искусственных газах, методик физического и численного моделирования, а также термодинамического анализа проведено исследование влияния способов управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины на энергетическую эффективность и экологичность газотурбинного цикла ПГУ на искусственном газе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Результаты экспериментального исследования влияния термического способа управления теплофизическими характеристиками рабочего тела на особенности горения модельных искусственных газов на основе СО.

2) Результаты численных исследований влияния термического способа управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины на экологичность сжигания искусственных газов, обобщающие и дополняющие технологии экологичного сжигания искусственных газов применительно к ГТУ.

3) Результаты термодинамических исследований влияния теплофизических характеристик рабочего тела на показатели работы простого цикла Брайтона.

Личный вклад автора. Общее направление экспериментальных, расчетных и теоретических работ задавалось научным руководителем профессором, д.т.н. Рыжковым А.Ф. Совместно с сотрудниками кафедры ТЭС УрФУ автор участвовал в научных исследованиях в рамках ряда грантов.

Автором лично выявлены и проанализированы способы управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины ПГУ на искусственных газах, разработаны программы, проведены экспериментальные и численные исследования влияния способов управления на характеристики горения модельных искусственных газов, проведен термодинамический анализ влияния способов управления на энергетические и экономические показатели газотурбинного цикла ПГУ на искусственном газе;

Достоверность результатов. Достоверность результатов экспериментального исследования обеспечивается применением современного оборудования с высокой точностью фиксации изменения параметров рабочих сред, подробным анализом погрешности измерений в экспериментах, использованием моделей расчета, верифицированных на основе общепринятых и собственных экспериментальных данных, использованием общепринятых методик термодинамического расчета и сопоставлением полученных расчетных результатов с известными фактическими и расчетными данными.

Апробация результатов. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на: IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 2015), IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015) I Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2016), I Научно-технической конференции молодых ученых УралЭНИН (Екатеринбург, 2016 г.), XIV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2016), II Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2017), VI Всероссийской конференции с международным участием «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Новосибирск, 2017), II Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов «Современные технологии в энергетике» (Москва, 2018), V Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» (Екатеринбург, 2018).

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из них 8 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 7 работ, опубликованных в журналах, индексируемых *Scopus* и *Web of Science*.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 123 наименований, и 17 приложений. Диссертация изложена на 196 страницах и снабжена 92 рисунками и 23 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрена актуальность исследуемой темы, сформулирована цель исследования, отражены научная новизна и практическая значимость

полученных результатов, приведены основные защищаемые положения, кратко излагается структура и содержание работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературных источников по теме исследования. Выявлено, что из двух типов ПГУ (с воздушным или кислородным окислителем) наибольшее распространение получили ПГУ, использующие стандартную ГТУ с воздушным окислителем, переведенную с проектного топлива (природный газ) на непроектное (искусственный газ воздушной или кислородной конверсии исходных твердых топлив). В них для снижения разрыва в энергетической эффективности с ПГУ на природном газе используют калорические и термические способы.

В основе калорических способов лежат процедуры унификации топливного газа по их теплоте сгорания. При разработке *Oxy-fuel* технологий со сжиганием топлив с более высоким содержанием горючих компонентов применяют глубокое разбавление кислорода углекислым газом или водяным паром. При применении непроектных топлив в стандартных ГТУ с воздушным окислителем состав рабочего тела приближают к проектному. При разработке *Oxy-fuel* технологий устоявшиеся решения отсутствуют.

В основе термических способов лежат процедуры изменения температурного уровня топлива и / или воздуха перед подачей в камеру сгорания ГТУ. Повышение температуры топливного газа от $30 \div 130^{\circ}\text{C}$ до $300 \div 500^{\circ}\text{C}$ увеличивает КПД ГТУ на $\sim 3 \div 5\%$. Нагрев циклового воздуха от 440°C до 800°C повышает КПД ГТУ на $\sim 3\%$ и КПД всей ПГУ с воздушной газификацией на $\sim 1,5\%$. Сравнение эффективности влияния разных способов на показатели работы газотурбинного цикла не производилось.

Во **второй главе** приведены методики исследований. В **разделе 2.1** представлена методика экспериментальных исследований, направленных на определение влияния нагрева воздуха на особенности горения СО, являющегося основным и наименее реакционным компонентом большинства искусственных газов, ограничивающим возможности низкоэмиссионного сжигания.

Целью исследования является:

1) определение режимов воспламенения и погасания факела предварительно не перемешанной смеси модельного синтез-газа (CO ; CO-N_2) и высоконагретого воздуха ($t_B = 400 \div 800^\circ\text{C}$) в спутном потоке – эксперименты №1 и №2;

2) выявление зависимости выбросов NO_x и полноты сгорания модельного синтез-газа от температуры и расхода воздуха – эксперимент №3.

Работа экспериментальной установки основана на микроструйном диффузионном способе сжигания газа в спутном потоке воздуха (рисунок 1).

Модуль для исследования процесса горения состоит из камеры, пятиступенчатой системы нагрева воздуха (электрической мощностью 3,8 кВт) и регулированием мощности.

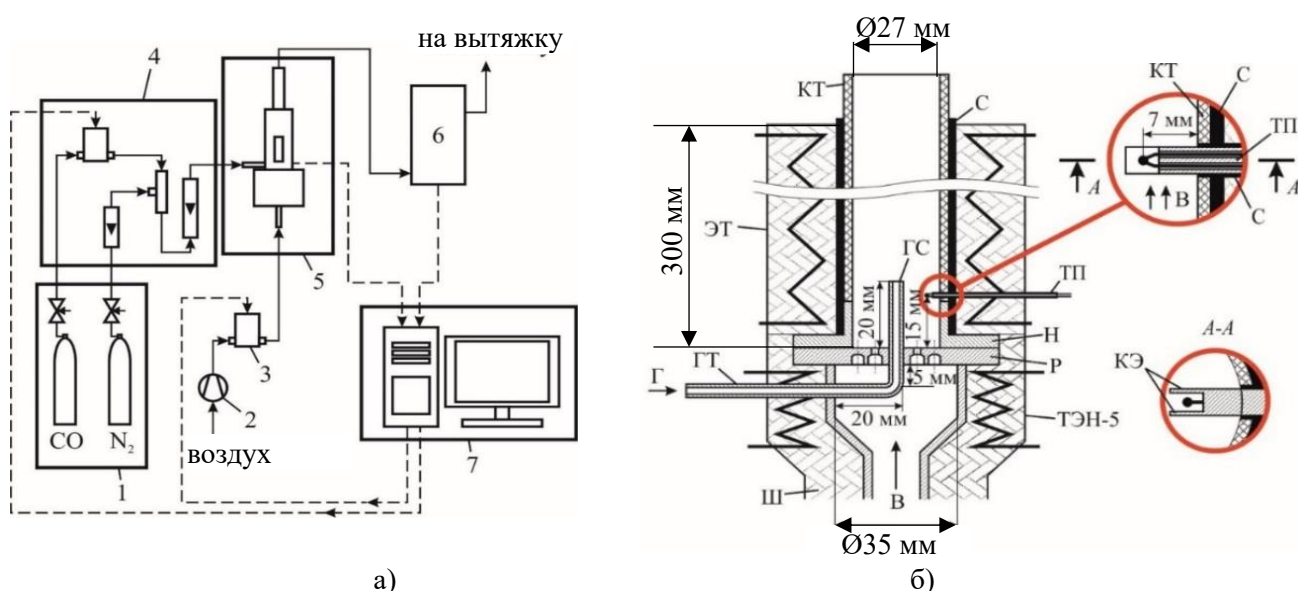


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда (а) и реакционной камеры (б)

Для управления ходом эксперимента и фиксирования данных создана мнемосхема в программном пакете *InduSoft Web Studio* с выводом контролируемых параметров на монитор компьютера в реальном времени. Регулирование температуры с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Состав продуктов сгорания определяется с помощью приборов КР-1353Е (серия ГАММА-100) и *Testo 330-2 LL*.

В области температуры стенки $t_{CT} = 600 \div 900^\circ\text{C}$ максимальная расчетная среднеквадратическая погрешность измерения температуры воздуха в диапазоне $t_B = 400 \div 800^\circ\text{C}$ составляет $\sigma_{\max} = 6\%$ (рисунок 2).

Исследование влияния режимов течения воздуха и СО на воспламенение и погасание факела (эксперимент №1) изучается при горении СО ($r_{CO}^{TG} = 100\%$) при $t_B = 610 \div 640^\circ\text{C}$, близкой к справочной температуре t_{CO} воспламенения СО с фиксацией расходов в момент зажигания и погасания факела (рисунок 3).

Исследование влияния разбавления СО азотом (N_2) на погасание факела (эксперимент №2) изучается для определения порога по низшей теплоте сгорания при $t_B = 400, 650$ и $790 \div 800^\circ\text{C}$.

Исследование влияния нагрева воздуха на экологические характеристики (NO_x , СО) продуктов сгорания (эксперимент №3) проводится в 5 температурных режимах с $t_B/t_\Gamma = 25^\circ\text{C} / 25^\circ\text{C}$ (I); $400^\circ\text{C} / 100^\circ\text{C}$ (II); $500^\circ\text{C} / 100^\circ\text{C}$ (III); $600^\circ\text{C} / 100^\circ\text{C}$ (IV); $800^\circ\text{C} / 100^\circ\text{C}$ (V).

В разделе 2.2 представлена методика численной оценки влияния повышения t_B/t_Γ на экологические характеристики продуктов сгорания искусственных газов (таблица 1) в ГТУ типа F (таблица 2), проводимой в CFD-пакете с использованием моделей гидродинамики, теплообмена и химических превращений, по которым ведется расчет процессов смешения газа и воздуха, лучистого теплообмена и горения газа, производимого с уточнением механизмов образования и разложения оксидов азота (NO_x). Газы сжигаются при $t_B/t_\Gamma = 400^\circ\text{C} / 300^\circ\text{C}$ (I), $500^\circ\text{C} / 500^\circ\text{C}$ (II) и $900^\circ\text{C} / 500^\circ\text{C}$ (III) с применением двух способов снижения

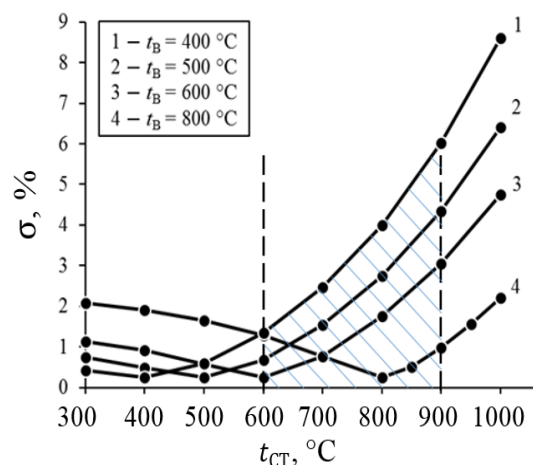


Рисунок 2 – Расчетная оценка влияния t_{CT} и t_B на погрешность термопары σ

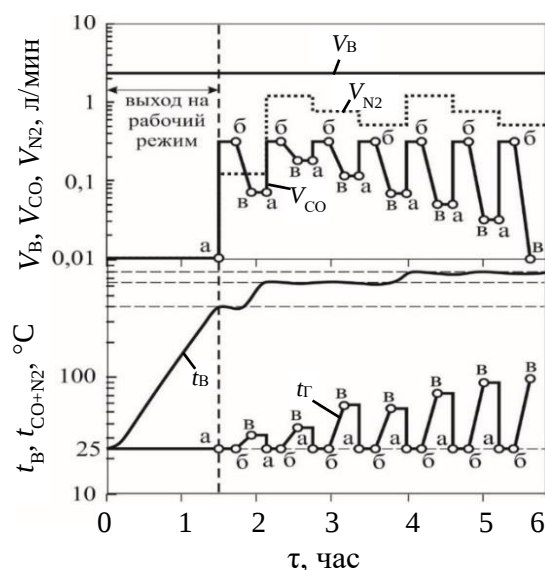


Рисунок 3 – Программа и результат проведения эксперимента №1:
(а-б) – воспламенение; (б-в) – погасание

выбросов NO_x – впрыска пара («мокрая» коррекция) и подачи азота («сухая» коррекция).

Таблица 1 – Составы искусственных газовых топлив

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Состав	CH_4 , об.%	0	0	0,7	0	0,7	0	0,7	0	0,7
	CO , об.%	18	7,8	9,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8
	CO_2 , об.%	20	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
	H_2 , об.%	2,5	20,4	25,5	11,1	11,1	16,7	16,7	27,8	27,8
	H_2O , об.%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	N_2 , об.%	54,4	62,0	54,1	51,1	50,5	45,5	44,8	34,5	33,7
	NH_3 , ppm	30; 1000								
	Q_i' , МДж/м ³	2,5	3,2	4,2	4,7	4,97	5,3	5,6	6,5	6,8

Верификация моделей для среднетемпературного (230°C) воздуха выполнена по экспериментальным данным *Hasegawa T.* и др. (2007), для высокотемпературного (800°C) воздуха – по данным эксперимента №3.

Таблица 2 – Основные параметры расчетной ГТУ

Параметр	Значение
Мощность ГТУ, МВт	300
Температура продуктов сгорания, °C	1400
Давление воздуха, МПа	1,8
Потери давления в камере сгорания, %	4

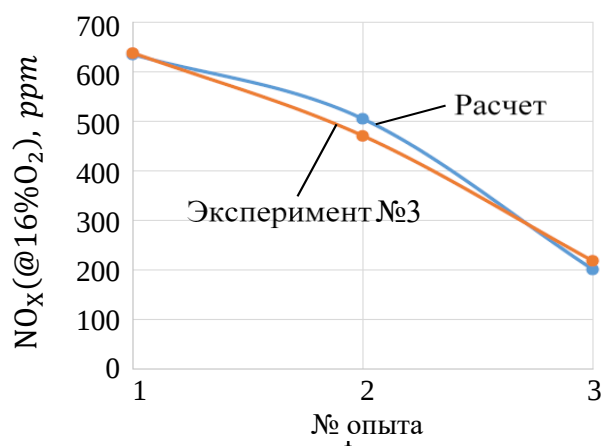
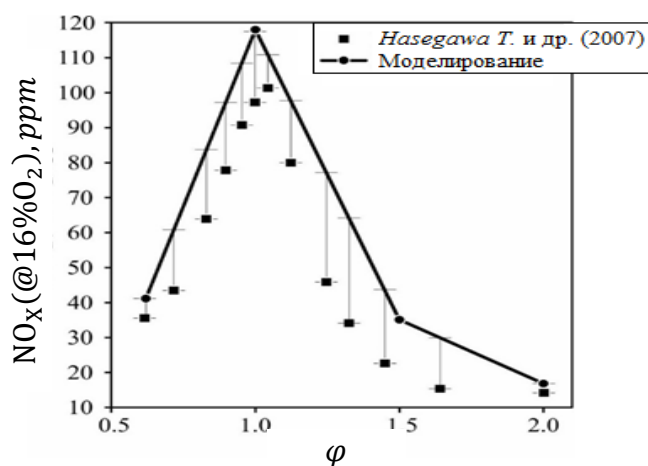


Рисунок 4 – Верификация расчета по данным *Hasegawa T.* (а) и по данным эксперимента №3 (б): ϕ – отношение расходов газа и воздуха

Среднеквадратичное отклонение расчетных результатов при $t_B = 230^\circ\text{C}$ составляет 15%, а расхождение с экспериментом при $t_B = 800^\circ\text{C}$ – $0,50 \div 7,89\%$ (рисунок 4).

В разделе 2.3 изложена методика термодинамического исследования влияния теплофизических характеристик рабочего тела (молярная масса μ_T , удельные массовая $c_{pT,T}$ и молярная $c_{p\mu,T}$ теплоемкости) на энергетические показатели (коэффициент распределения ψ_T энтальпии рабочего тела в

механическую работу турбины и в тепловую энергию, передаваемую в паросиловой цикл ПГУ; удельные работы сжатия l_K , расширения l_T и цикла в целом l_0 ; подведенная теплота q_1 ; топливный коэффициент b ; температура и давление в характерных точках цикла $T_1 - T_4$, $P_1 - P_4$) и на экономические показатели

Таблица 3 – Диапазон вариации управляющих параметров

Параметр x_i	Единицы измерения	Значение параметра	
		min	max
P_3	МПа	1,1	33,0
P_4	МПа	0,1	3,0
π_T	-	11	18
t_3	°C	1100	1400
$(H_2O)_T$	об. %	0	100
$(CO_2)_T$	об. %	0	100
$(N_2)_T$	об. %	~1÷2	~70÷80
$(O_2)_T$	об. %	~1÷2	~15
k_T	-	1,170	1,666
μ_T	кг/кмоль	4	132
$c_{pm,T}$	кДж/(кг·К)	0,158	5,204

(внутренний КПД η_i) простого газотурбинного цикла Брайтона в диапазоне рабочих параметров, представленных в таблице 3.

В качестве исследуемых приняты рабочие тела четырех типов, применяемых на практике и в расчетах газотурбинных циклов и получаемых при сжигании: $[A]$ (от «Air») – искусственных и природных газов в воздухе; $[H]$ (от «Hydrogen») – синтез-газов после отделения углерода по технологии *pre-combustion CCS* в среде O_2-H_2O ; $[C]$ (от «Carbon») – синтез-газов O_2-CO_2 конверсии в среде O_2-CO_2 ; $[G]$ (от «Gas») – смеси гелия с ксеноном, азотом или аргоном, используемые в цикле ЗГТУ.

Основные соотношения, применяемые в расчете:

$$l_K = (c_{pm,K} \cdot T_1) \cdot \tilde{l}_K; \tilde{l}_K = \frac{\pi_K^{m_K} - 1}{\eta_{oi}^K}; m_K = \frac{R_\mu}{c_{pm,K}} \quad (2.1)$$

$$l_T = (c_{pm,T} \cdot T_1) \cdot \tilde{l}_T; \tilde{l}_T = \xi \cdot \eta_{oi}^T \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{m_T}}\right); m_T = \frac{R_\mu}{c_{pm,T}} \quad (2.2)$$

$$\tilde{l}_0 = (1 + b) \cdot \xi \cdot \tilde{l}_T - \tilde{l}_K; \eta_i = \frac{\tilde{l}_0}{\tilde{q}_1}; \xi = \frac{T_3}{T_1}; \pi_K = \frac{P_2}{P_1}; \pi_T = \frac{P_3}{P_1} \quad (2.3)$$

$$\psi_T = \frac{l_T}{c_{pm,T} \cdot T_3} = 1 - \frac{1}{\pi_T^{m_T}}; b = \frac{T_1 \cdot (\xi - \pi_K^{m_K})}{\frac{Q_i^r}{c_{pm,K}} - T_1 \cdot (\xi - \pi_K^{m_K})} \quad (2.4)$$

Представлена методика расчета чувствительности удельной работы газовой турбины l_T и газотурбинного цикла в целом l_0 к вариации состава и температуры нагрева компонентов рабочего тела газовой турбины. Отклонение расчетных

данных, полученных по описанной методике, от результатов коммерческого программного пакета *Thermoflow* менее 5%.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования. В эксперименте №1 получено, что расход газа в момент погасания составляет ~10÷30% от начального и линейно увеличивается с ростом расхода горячего воздуха (рисунок 5). Эквивалентное отношение расходов газа и воздуха в момент воспламенения ($\varphi_1 = V_{CO}/V_B$) и в состоянии устойчивого горения уменьшается с нагрузкой от $\varphi_1 = 0,25$ до $\varphi_1 = 0,10$, а в момент погасания – увеличивается от $\varphi_2 = 0,013$ до $\varphi_2 = 0,032$, что примерно в 2 раза медленнее, чем рост V_{CO} .

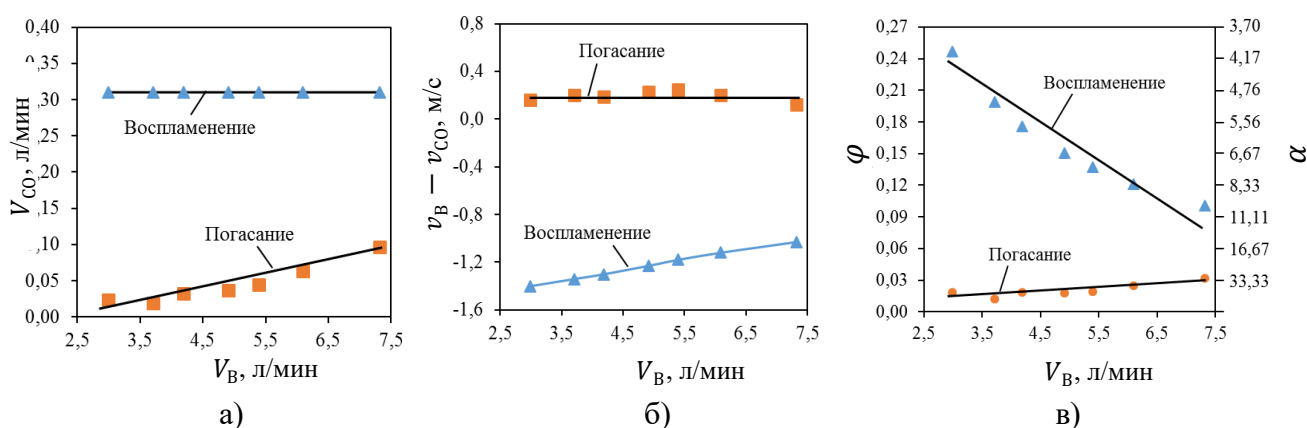


Рисунок 5 – Зависимости расхода СО (а), разности скоростей СО и воздуха (б), эквивалентного отношения расходов газа и воздуха и коэффициентов избытка воздуха (в) от расхода воздуха в моменты воспламенения и погасания

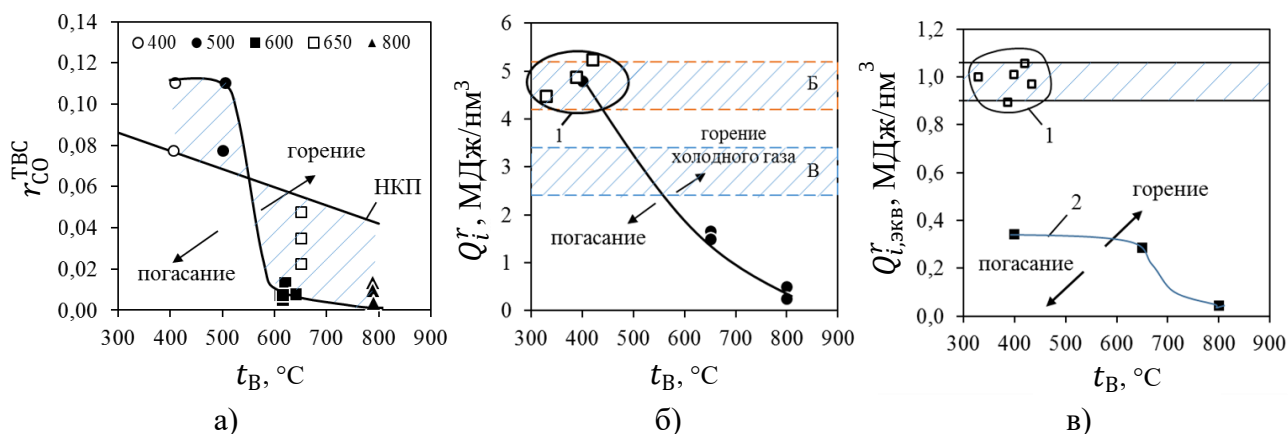


Рисунок 6 – Влияние температуры воздуха (t_B) на предельное содержание СО в топливоздушном смеси (а), на предельную Q_i^r (б), на предельную $Q_i^r_{экв}$ (в): 1 – рабочий режим в освоенных ПГУ на искусственных газах; 2 – эксперимент

В эксперименте №2 получено, что минимальная концентрация СО на пределе погасания при $t_B > 600^\circ\text{C}$ ниже, а при $t_B < 600^\circ\text{C}$ – выше расчетного нижнего концентрационного предела кинетического факела – НКП (рисунок 6а). При

нагреве воздуха до $790 \div 800^\circ\text{C}$ значение Q_i^r погасания диффузионного факела снижается до $0,248 \div 0,502 \text{ МДж/нм}^3$ вместо $4,2 \text{ МДж/нм}^3$ в обычном режиме.

Для ориентировки на рисунке 6б нанесены области Б и В для искусственных газов перед их сжиганием в ГТУ. Как видно, экспериментальная камера сгорания при стандартном нагреве воздуха ($t_B = 400^\circ\text{C}$) не обеспечивает работу на газе из области Б. При более высоком нагреве воздуха исследуемый газ может устойчиво сжигаться как в области Б, так и в области более бедных газов В.

Эквивалентная теплота сгорания топливовоздушной смеси $Q_{i,\text{ЭКВ}}^r$ качественно повторяет кривую для $r_{\text{CO}}^{\text{TBC}}$. Как следует из рисунка 6в, запас устойчивости по эквивалентной теплоте сгорания в стандартном режиме ($t_B = 400^\circ\text{C}$) составляет:

$$(Q_{i,\text{ЭКВ}}^r)_{\text{раб.режим}} / (Q_{i,\text{ЭКВ}}^r)_{\text{потухание}} \approx 3$$

С увеличением t_B до 800°C запас устойчивости повышается до ~ 10 .

В эксперименте №3 проведено две серии опытов:

1 – сжигание чистого СО в режимах I-IV;

2 – сжигание смеси СО- N_2 в режиме V.

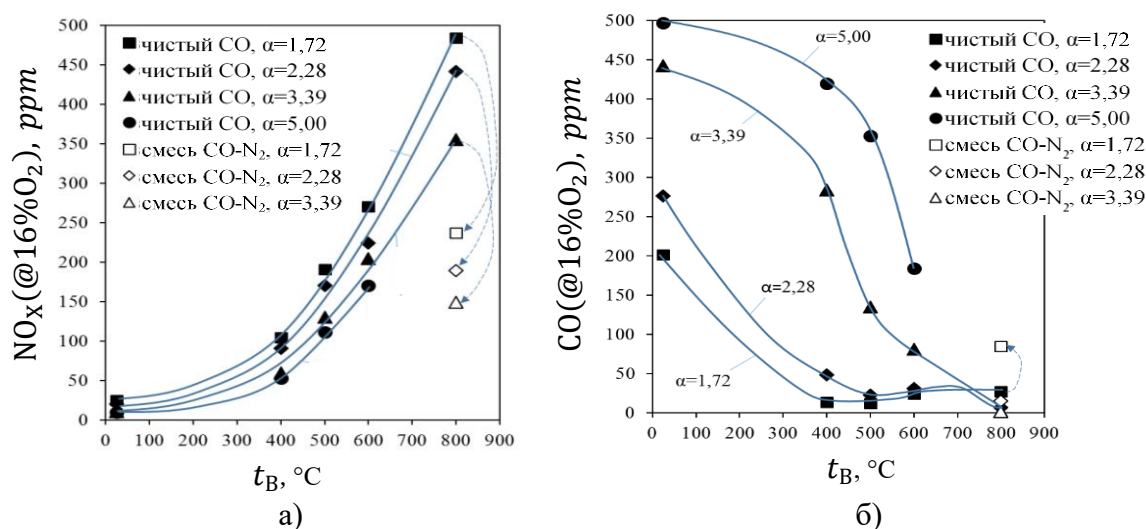


Рисунок 7 – Зависимость термических NO_x (а) и химического недожога (б) от температуры и коэффициента избытка воздуха

Получено, что, как и в известных режимах, при повышении t_B выход NO_x увеличивается, а выход СО уменьшается. Обеднение газа с $12,65$ до $8,54 \text{ МДж/нм}^3$, происходящее при снижении концентрации СО в газе от 100 до $67,5 \text{ об.}\%$,

уменьшает выбросы NO_x в ~ 2 раза, не сказываясь заметно на выходе CO (рисунок 7).

Обобщая результаты экспериментов, можно заключить, что если сжигание концентрированных газов в высокотемпературном воздушном окислителе недопустимо вследствие многократного увеличения выбросов NO_x , то резко возрастающий при этом запас устойчивости горения по Q_i^r (до $0,248 \div 0,502$ МДж/нм³ вместо достигнутых 4,2 МДж/нм³ в обычном режиме) позволяет обратиться к поиску режимов экологичного сжигания низкокалорийных искусственных газов путем применения отработанных в технике приемов.

В четвертой главе представлены результаты численного исследования выбросов NO_x при впрыске пара («мокрая» коррекция) и подаче азота («сухая» коррекция) в ГТУ класса F (рисунок 8)

Получено, что при сухой коррекции в режиме I ($t_B / t_T = 400^\circ\text{C} / 300^\circ\text{C}$) выбросы NO_x становятся ниже действующих нормативных (50 мг/нм³) при Q_i^r менее $4,7 \div 5$ МДж/нм³ (рисунок 8а) и ниже перспективных нормативов (25 ppm ≈ 32 мг/нм³) при Q_i^r менее 4,4 МДж/нм³, что соответствует работе ПГУ на низкокалорийном искусственном газе.

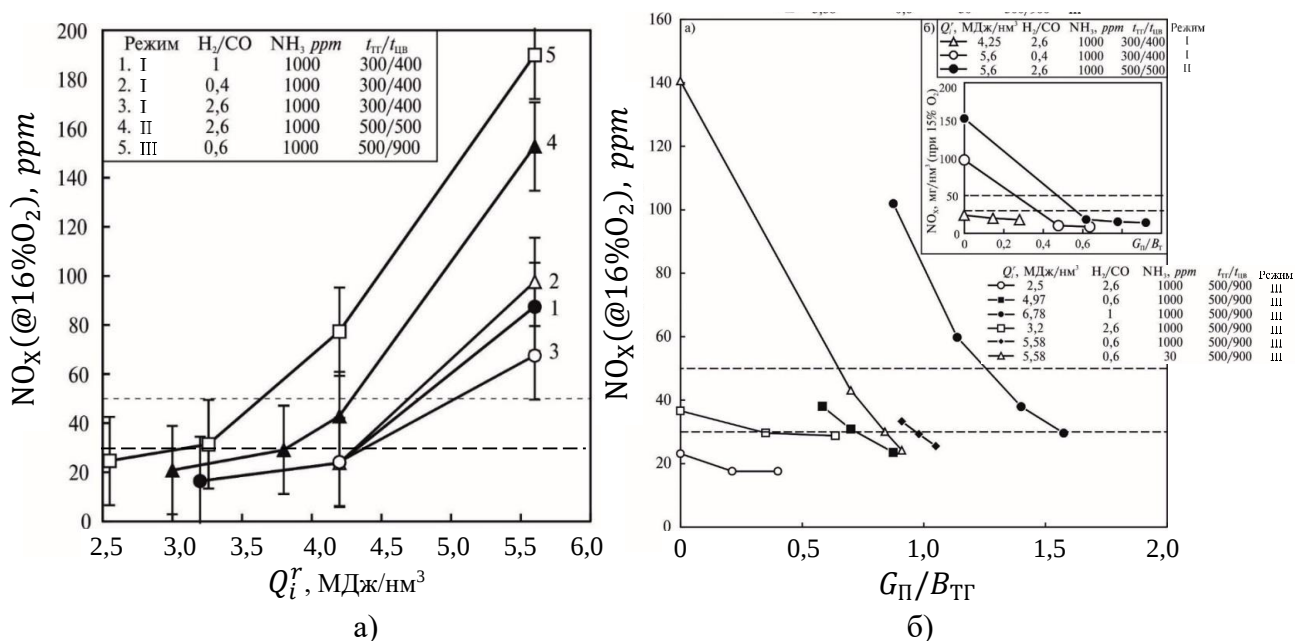


Рисунок 8 – Влияние сухой (а) и мокрой (б) коррекции на выход NO_x

В режиме II ($t_B / t_T = 500^\circ\text{C} / 500^\circ\text{C}$) снижение Q_i^r от 5,6 до 4,3 МДж/нм³ приводит к уменьшению выбросов NO_x до уровня действующих нормативов, а при

$Q_i^r < 3,8 \text{ МДж/нм}^3$ выбросы NO_x становятся ниже перспективных нормативов (рисунок 8а).

В режиме III ($t_b / t_T = 900^\circ\text{C} / 500^\circ\text{C}$) действующий норматив поддерживается при $Q_i^r < 3,6 \text{ МДж/нм}^3$, а перспективный – $Q_i^r < 3,25 \text{ МДж/нм}^3$.

Сочетание методов сухой и мокрой коррекции (рисунок 8б) позволяет сжигать искусственный газ в температурных режимах $500^\circ\text{C}/500^\circ\text{C}$ и $900^\circ\text{C}/500^\circ\text{C}$ с выбросами NO_x ниже нормируемых значений при $Q_i^r = 2,5 \div 4,2 \text{ МДж/нм}^3$, превышающих на порядок найденный в экспериментах порог потухания.

В пятой главе представлены результаты *термодинамического исследования* влияния теплофизических свойств рабочего тела газовой турбины на работу газотурбинного цикла Брайтона в диапазоне управляющих параметров из таблицы 3.

Расчетные зависимости работы компрессора l_K и турбины l_T от μ_K и μ_T соответствующих рабочих тел для параметров P_3 и T_3 , применяемых в освоенных ПГУ представлены на рисунке 9.

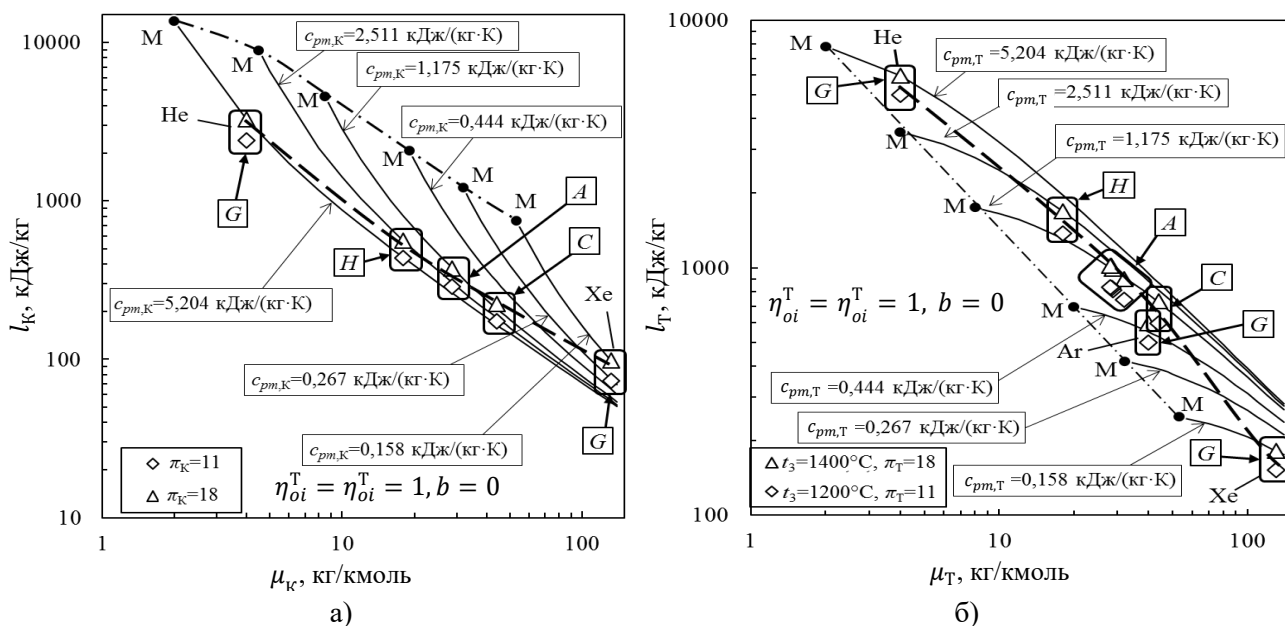


Рисунок 9 – Зависимость работы компрессора l_K от μ_K (а) и зависимость работы l_T от μ_T (б)

Наименьшая работа сжатия / расширения получается для тяжелых газов (Xe , CO_2), наибольшая – для легких (He , H_2O). Стандартное рабочее тело (СРТ), получаемое при сжигании природного газа в воздухе, занимает промежуточное

положение. Доля энтальпии рабочего тела, переходящей в механическую работу, уменьшается от 33% для одноатомных газов до 60÷70% для H_2O и CO_2 (рисунок 10).

С повышением $c_{p\mu,T}$ безразмерные работы турбины $\tilde{l}_T$ и компрессора $\tilde{l}_K$ уменьшаются, но $\tilde{l}_K$ уменьшается медленнее. С понижением $c_{p\mu,T}$ работы $\tilde{l}_T$ и $\tilde{l}_K$ увеличиваются, но $\tilde{l}_K$ растет быстрее. При этом полезная работа газотурбинного цикла $\tilde{l}_0$ имеет ограниченный диапазон реализаций от $(c_{p\mu,T})_{\min}$ до $(c_{p\mu,T})_{\max}$, в пределах которого $\tilde{l}_0$ и внутренний КПД цикла η_i проходят через свои максимумы (рисунки 11 и 12).

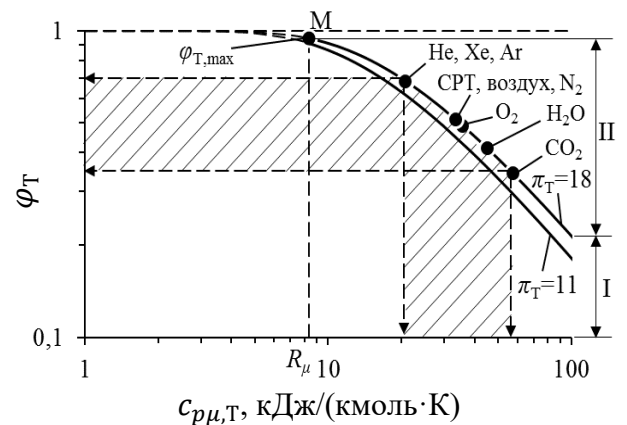


Рисунок 10 – Зависимость параметра φ_T от $c_{p\mu,T}$ при $t_3 = 1400^\circ C$: I – доля энтальпии, переходящая в l_T ; II – доля энтальпии, переданная в котел-утилизатор

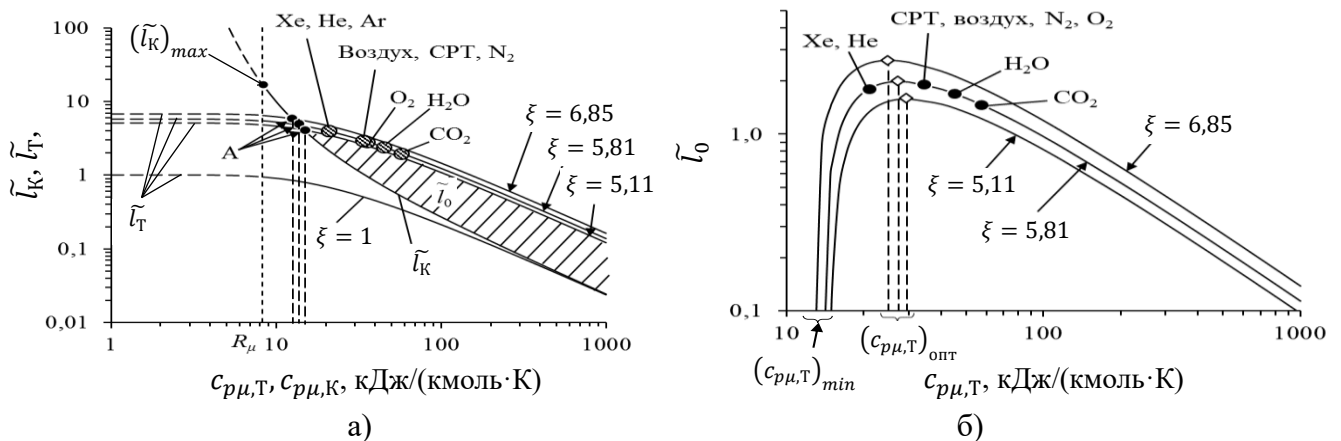


Рисунок 11 – Зависимости $\tilde{l}_T$, $\tilde{l}_K$ (а) и $\tilde{l}_0$ (б) от теплофизических характеристик рабочего тела при $\pi_T = \pi_K = 18$

Значение $(c_{p\mu,T})_{\text{опт}}$, отвечающее максимальной работе цикла $(\tilde{l}_0)_{\max}$ при $\pi_T = \pi_K = \pi$ и $c_{p\mu,T} \approx c_{p\mu,K}$ находится по процедуре определения положения экстремума функции одной переменной:

$$\left. \frac{d\tilde{l}_0}{dc_{p\mu,T}} \right|_{c_{p\mu,T}=(c_{p\mu,T})_{\text{опт}}} = \frac{d}{dc_{p\mu,T}} \left[(1+b) \cdot \xi \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi^{R_\mu/c_{p\mu,T}}} \right) \cdot \eta_{oi}^T - \frac{\pi^{R_\mu/c_{p\mu,T}} - 1}{\eta_{oi}^K} \right] = 0 \quad (5.1)$$

Решением уравнения является:

$$(c_{p\mu,T})_{\text{опт}} = 2 \cdot R_{\mu} \cdot \frac{\ln \pi}{\ln(\eta_{oi}^K \cdot \eta_{oi}^T \cdot (1+b) \cdot \xi)} \quad (5.2)$$

Оптимальное значение $(c_{p\mu,T})_{\text{опт}}$, соответствующее $(\tilde{l}_0)_{\text{max}}$ зависит от ряда определяющих параметров: 1) термодинамические параметры – π и ξ ; 2) необратимые потери – η_{oi}^T и η_{oi}^K ; 3) способ подвода тепла и тип применяемого топлива – топливный коэффициент b (рисунок 13).

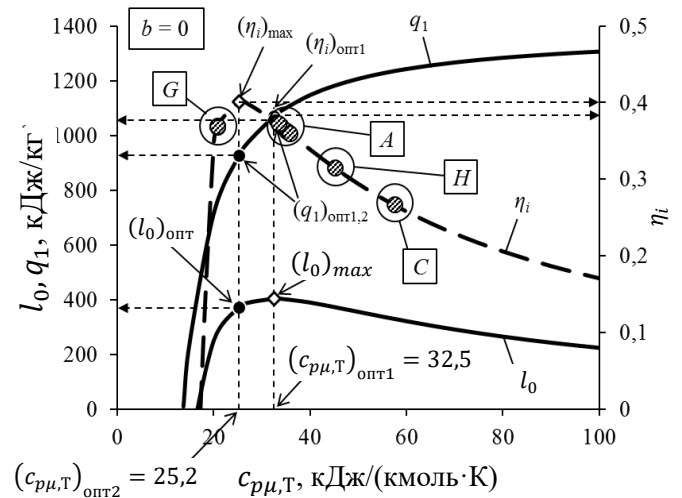


Рисунок 12 – Зависимость η_i , q_1 и l_0 от $c_{p\mu,T}$ при $\pi_T = \pi_K = 18$

Оптимальное значение степени сжатия $\pi_{\text{опт}}$, соответствующее данной теплоемкости $(c_{p\mu,T})_{\text{опт}}$, описывается показательной функцией, получаемой преобразованием формулы (5.2) к известному виду:

$$\pi_{\text{опт}} = \sqrt[2 \cdot m]{\eta_{oi}^K \cdot \eta_{oi}^T \cdot (1+b) \cdot \xi} \quad (5.3)$$

Результаты расчета $\pi_{\text{опт}}$ приведены на рисунке 14. Точками на графике обозначены фактические данные освоенных и расчетные данные перспективных ГТУ на искусственных газах с воздушным окислителем. Для сравнения представлены фактические данные освоенных ГТУ на природном газе. Как видно, большинство ГТУ на искусственных газах работает при параметрах близких к оптимальным (рисунок 14).

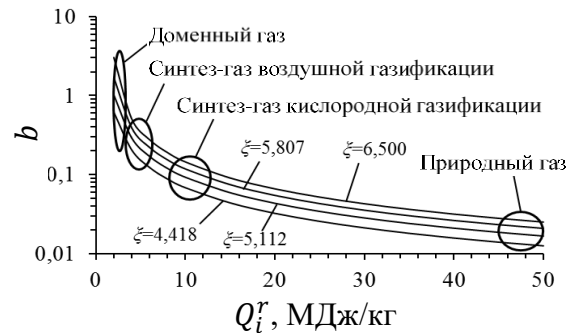


Рисунок 13 – Зависимость топливного коэффициента b от параметров Q_i^r и ξ при $T_1 = 288,15 \text{ K}$, $m_T = 0,286$ и $c_{p\mu,T} = c_{p\mu,K} = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$

В соответствии с выполненным анализом, изменение работы газовой турбины в сторону увеличения в процессе коррекции может происходить за счет роста $c_{pm,T}$ (слабый фактор) и снижения μ_T (сильный фактор). Наиболее ярко сочетание слабого и сильного факторов проявляется при изменении соотношения трехатомных газов $-\frac{H_2O}{H_2O+CO_2}$. Эффективность действия этого соотношения зависит от типа окислителя (воздух, кислород) и разбавителя (N_2 , H_2O , CO_2). При сжигании в воздухе чувствительность к этому соотношению низкая (рисунок 15а), при сжигании в кислороде – значительная (рисунок 15б).

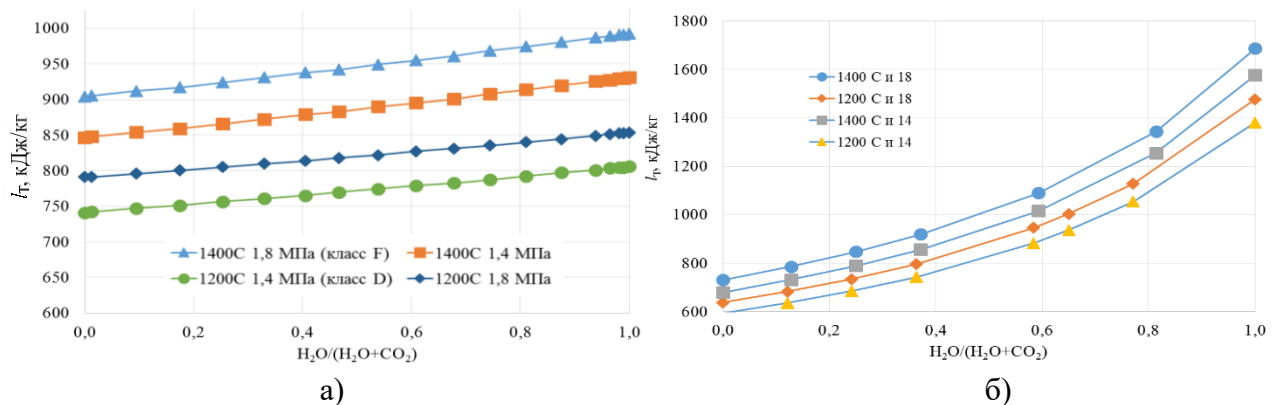


Рисунок 15 – Влияние состава рабочего тела на l_T при сжигании в воздухе (а) и в кислороде (б)

Полученные результаты объясняют причину слабого влияния применяемых на практике разнообразных способов коррекции температуры и состава топливного газа и окислителя при переводе промышленной стандартной ГТУ на непроектное топливо (рисунок 16, области II и III) и резкого изменения l_T при переходе к сжиганию CO в O_2-CO_2 (рисунок 16, область I) и H_2 в O_2-H_2O (рисунок 16, область IV).

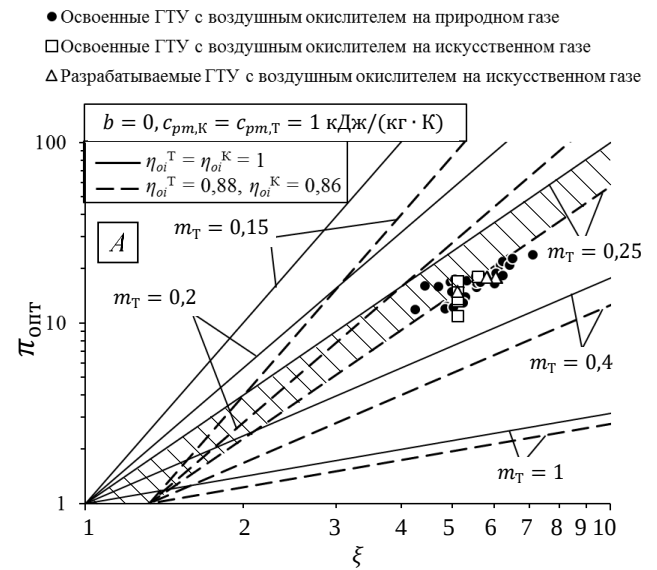


Рисунок 14 – Зависимость оптимальных термодинамических параметров в простом ГТЦ от степени нагрева рабочего тела

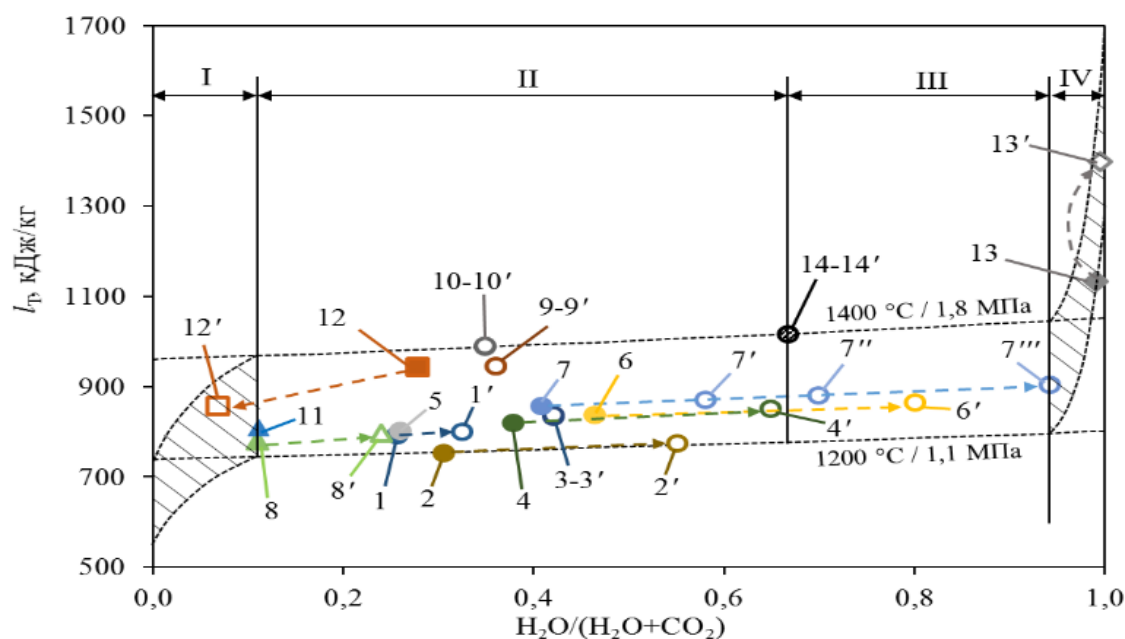


Рисунок 16 – Зависимость l_T от состава рабочего тела газовой турбины: точка без «'» – рабочее тело до коррекции; точка с «'» – рабочее тело после коррекции\

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены и проанализированы применяемые на практике и перспективные, находящиеся в разработке, калорические (коррекция состава и теплоты сгорания топливного газа) и термические (вариация температурного режима подготовки топливного газа и воздуха) способы управления теплофизическими характеристиками рабочего тела газовой турбины ПГУ на искусственных газах.

Калорический способ управления позволяет получить две новые группы топливных газов перед подачей в камеру сгорания ГТУ, отличающиеся по диапазону применяемых на практике теплот сгорания Q_i^r .

Термический способ находится на стадии разработки. По расчетным данным нагрев воздуха от 440°C до 900°C повышает КПД ГТУ на ~3% и КПД ПГУ с воздушной газификацией на ~1,5%. Повышение температуры искусственного газа от 30÷130°C до 300÷500°C увеличивает КПД ГТУ на ~3÷5%.

В опубликованных работах влияние обоих способов управления на энергетические и экономические показатели ПГУ на искусственном газе учтено со стороны количественного воздействия: увеличение массового расхода рабочего

тела газовой турбины, уменьшение массового расхода рабочего тела компрессора, уменьшение расхода топливного газа.

По результатам анализа литературы поставлены основные задачи для исследования влияния калорических и термических способов управления на энергетические и экономические показатели ГТУ на искусственном газе со стороны качественного воздействия – чувствительности работы газовой турбины l_T и газотурбинного цикла (ГТЦ) l_0 к способам управления.

2. Разработана методика экспериментального исследования, позволяющая проводить исследование влияния термического способа управления на процесс горения модельных искусственных газов на основе СО с погрешностью измерения температуры воздуха менее 6%. Получено, что если сжигание концентрированных искусственных газов в высокотемпературном воздухе недопустимо вследствие многократного увеличения выбросов NO_x , то резко возрастающий при этом запас устойчивости горения по Q_i^r , выявленный в экспериментальной части работы, (до $0,248 \div 0,502$ МДж/нм³ вместо достигнутых 4,2 МДж/нм³ в обычном режиме) позволяет обратиться к поиску режимов экологичного сжигания низкокалорийных искусственных газов путем применения отработанных в технике приемов.

3. Разработана и верифицирована по литературным и собственным экспериментальным данным методика численного моделирования, позволяющая выявить режимы экологичного сжигания искусственных газов применительно к промышленным ГТУ, в диапазоне низших теплот сгорания $2,5 \div 4,2$ МДж/нм³, превышающем на порядок найденный в экспериментах порог потухания.

Проведена расчетная оценка влияния термического способа управления на выбросы NO_x при сжигании искусственных газов. Определены расчетные режимы (применительно к промышленным ГТУ) экологичного сжигания искусственных газов с выбросами NO_x ниже нормируемых по российским и европейским документам в диапазоне $Q_i^r = 2,5 \div 3,2$ МДж/нм³.

4. Разработана методика термодинамического анализа, позволяющая сформировать новый подход к оценке эффективности ГТЦ на основе выявления

экстремальной зависимости между теплофизическими характеристиками рабочего тела и энергетическими показателями ГТЦ. Найдена связь между оптимальными теплофизическими характеристиками рабочего тела и термодинамическими параметрами ГТЦ. Определена чувствительность l_T и l_0 к калорическим и термическим способам управления.

Выявленные расчетные зависимости энергетических и экономических показателей газовой турбины и ГТЦ от теплофизических характеристик рабочего тела создают теоретическую основу для разработки перспективных энергетических циклов на основе газотурбинных технологий. Практические результаты работы могут найти применение на предприятиях ТЭК.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Филиппов П. С. Разработка способа сжигания бедных газов в камере сгорания газовой турбины / Е. И. Левин, Н. А. Абаимов, П. С. Филиппов, А. Ф. Рыжков, Б. Буян // Тепловые процессы в технике. 2015. № 6. С. 282-287; 0,375 п.л. / 0,1 п.л.
2. Filippov P. Use of poor industrial gases for power generation in the combined cycle / A. Ryzhkov, E. Levin, P. Filippov // Metallurgical and Mining Industry. 2015. №6. P.629-641 (Scopus); 0,8 п.л. / 0,4 п.л.
3. Filippov P. S. Making More Efficient Use of Blast-Furnace Gas at Russian Metallurgical Plants / A. F. Ryzhkov, E. I. Levin, P. S. Filippov, N. A. Abaimov, S. I. Gordeev // Metallurgist. 2016. V.60. №1-2. P.19-30 (Scopus, Web of Science); 0,75 п.л. / 0,3 п.л.
4. Filippov P. S. Analytical calculation of adiabatic processes in real gases / I. B. Amarskaja, V. S. Belousov, P. S. Filippov // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.754. №11. Paper number 112003 (Scopus); 0,25 п.л. / 0,05 п.л.
5. Filippov P. S. Validation of the thermal NO_x emissions model from a gas fuel combustor under atmospheric pressure / P. S. Filippov, P. Y. Khudyakov, A. F. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V.899. №9. Paper number 092005 (Scopus); 0,375 п.л. / 0,25 п.л.
6. Filippov P. Selection of technology for the low calorific synthetic gas combustion in the gas turbine combustion chamber / P. Filippov, E. Levin, A. Ryzhkov // EPJ Web of Conferences. 2017. V.159. Paper number 0012 (Scopus); 0,3 п.л. / 0,2 п.л.

7. Filippov P. S. Experimental investigation of the high-temperature air heating effect on the model artificial gas combustion process / P. S. Filippov, P. Y. Khudyakov, A. F. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V.1382. Paper number 012193 (Scopus); 0,3 п.л. / 0,2 п.л.

8. Filippov P. S. Influence of the working fluid thermophysical parameters variation on the gas turbine cycle performance / P. S. Filippov, E. M. Tolmachev, T. F. Bogatova, A. F. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V.1359. Paper number 012124 (Scopus); 0,375 п.л. / 0,15 п.л.

Публикации в других изданиях:

9. Филиппов П. С. Влияние состава топливного газа на термодинамические параметры цикла ГТУ / П. С. Филиппов, И. П. Лазебный, Т. Ф. Богатова, А. Ф. Рыжков // Газотурбинные технологии. 2019. №7. С.30-32; 0,2 п.л. / 0,1 п.л.

Подписано в печать
____.____.2021

Формат 60х84 1/16

Бумага писчая

Офсетная печать

Тираж 110

Заказ №

Ризография НИЧ ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19