

На правах рукописи



БЕТИНСКАЯ ОКСАНА АНДРЕЕВНА

**ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В УНИВЕРСАЛЬНОЙ
КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ
УТИЛИЗАЦИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА**

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре ракетно-космической техники и энергетических систем ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Бульбович Роман Васильевич

Официальные оппоненты: **Мингазов Биалал Галавтдинович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ», заведующий кафедрой «Реактивные двигатели и энергетические установки»;

Комаров Олег Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Турбины и двигатели»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «20» апреля 2017 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента Б.Н. Ельцина»: <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=264742>

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

На сегодняшний день особенно остро стоит вопрос утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ), т.к. сейчас он либо выбрасывается в атмосферу, либо сжигается в горелках, не принося при этом практической пользы. Одним из наиболее рациональных вариантов утилизации влажного неподготовленного ПНГ на малодебитных месторождениях является использование газотурбинных установок (ГТУ) для получения электрической и тепловой энергии. Подобных отечественных установок не существует, поэтому нефтедобывающие компании вынуждены покупать дорогостоящие импортные установки (Capstone, Opra, Flex Energy), предназначенные для получения резервной электрической или тепловой энергии при сжигании метана, пропана или природного газа. Опыт эксплуатации подобных установок на малодебитных месторождениях при утилизации ПНГ показал, что фактический ресурс работы составляет 20 – 25 % от заявленного в паспортных данных (100 тыс. час., капитальный ремонт 60 тыс. час.). Дефектация, фрактографический и рентгеноспектральный анализ детали-сборочных единиц (ДСЕ) установок типа Capstone после их аварийного останова показал, что причиной выхода установки из строя явился помпаж компрессора, вызванный нестационарными режимами работы камеры, возникновением неустойчивости рабочего процесса, несоответствием ПНГ стандартным топливам CH_4 , C_3H_8 , для которых предназначены импортные установки. ПНГ имеет различный компонентный состав в зависимости от месторождения. Более того, на одном и том же месторождении состав ПНГ является различным в разные периоды времени.

На некоторых крупных нефтяных месторождениях ПАО "Оренбургнефть" эксплуатируются установки DTG-1,8G OPRA электрической мощностью 1,8 МВт, в которых рабочее тело турбины образуется в результате сжигания топлива с переменным компонентным составом и различной теплотворной способностью. Однако при их эксплуатации на номинальном режиме возникают вибрации, которые являются причиной выхода из строя редуктора в составе турбокомпрессора.

Таким образом, для утилизации разнородных по составу, забалластированных, неосушенных ПНГ необходима разработка специальной

камеры сгорания (КС), высокий ресурс работы которой достигается обеспечением гарантийного запаса по устойчивости в реальных условиях эксплуатации.

В данной работе проведены исследования, направленные на разработку универсальной по коэффициенту избытка воздуха в зоне горения КС для отечественной ГТУ блочно-модульного типа мощностью 145 кВт и на этой основе даны практические рекомендации для последующих разработок высокоресурсных утилизационных КС.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время имеется большое количество разработанных и изготовленных ГТУ различных мощностей и назначения со встроенными и выносными КС. Аналогами разрабатываемой утилизационной КС является жаровая труба КС авиационного двигателя и двухзонный газогенератор жидкостных ракетных двигателей с горючим постоянного состава.

На сегодняшний день в технической литературе имеется огромное количество результатов по термохимическим и термодинамическим расчетам горения и концентрационных пределов горения углеводородных топлив в воздухе, однако подобные данные отсутствуют для забалластированных, разнородных по составу ПНГ.

Для выбора оптимальных параметров рабочего процесса в утилизационных КС для ПНГ и других техногенных газов могут быть использованы численные модели турбулентного течения и горения, реализованные в программных комплексах ANSYS и FlowVision. Однако для подробного исследования процессов в зоне горения требуется использование дополнительно разработанной программы.

В мировой практике отсутствуют специально разработанные и изготовленные утилизационные ГТУ для малодобитных нефтяных месторождений.

Цели и задачи

На основе проведенных обзора и анализа проблемы утилизации ПНГ была поставлена **цель** работы: разработка методики проектирования утилизационной КС в составе ГТУ для малодобитных нефтяных месторождений и выработка рекомендаций по увеличению ресурса их работы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) проведен анализ причин аварийного останова импортных энергоустановок и выработаны концепции увеличения ресурса работы отечественных утилизационных установок на малодебитных месторождениях;
- 2) разработана методика проектирования универсальных КС как подсистем утилизационных ГТУ, предназначенных для сжигания разнородных по составу ПНГ;
- 3) разработана численная модель сжигания ПНГ и проведена ее верификация на основе полученных экспериментальных данных.

Научная новизна

1. Впервые получены теоретические параметры горения (температура, составы, пределы горения) ПНГ сложного состава различных месторождений и проведена их верификация с полученными экспериментальными данными.
2. Предложена методика проектирования универсальных КС для утилизации разнородных нефтяных и техногенных газов сложного состава.
3. Впервые получены результаты численного моделирования турбулентного течения и горения ПНГ сложного состава в объеме универсальной КС.
4. Разработаны рекомендации по организации рабочего процесса в универсальных КС ГТУ для повышения ресурса работы.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты термохимических и термодинамических расчетов ПНГ сложного состава различных месторождений позволили выбрать оптимальные параметры рабочего процесса утилизационной КС.

Результаты численного моделирования рабочего процесса и их верификация с полученными экспериментальными данными позволили разработать рекомендации по увеличению ресурса работы утилизационных КС в процессе их эксплуатации на малодебитных месторождениях.

Разработанная экспериментальная установка позволяет исследовать параметры рабочего процесса на различных режимах горения нефтяных и других техногенных газов.

Полученные результаты использованы при разработке конструкторской документации утилизационной КС в составе ГТУ с полезной мощностью 145

кВт (договор с ПАО «Протон-ПМ»), при создании экспериментального огневого стенда в лаборатории испытаний и внедрены в учебный процесс подготовки кадров по направлениям 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» и 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», реализуемым на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ.

Основные результаты работы вошли в научно – технические отчеты по договорам на создание и передачу научно-технической продукции между ПНИПУ и ПАО «Протон-ПМ»: №2011/45 от 01.03.2011 г.; № 13313/12 от 14.05.2012; №2012/379 от 17.09.2012; №2012/380 (13257/12) от 17.09.2012. Результаты работы содержатся также в отчетах НИР по договору о предоставлении гранта № 2963гу2/2014 от 29.07.2014 г. от фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. В настоящее время ведутся научно-исследовательские работы по гранту РФФИ «Разработка энергоустановки для утилизации нефтяных газов на малодебитных месторождениях с выработкой электрической энергии» в соответствии с договором № 16-48-590072/16 от 16.04.2016г.

Личный вклад автора. Автор непосредственно выполнял все представленные в работе инженерные и численные расчеты, участвовал в обработке, анализе и обобщении полученных расчетных и экспериментальных данных. В результате автором была сформулирована методика проектирования универсальной КС для утилизации ПНГ на малодебитных месторождениях.

Методология и методы исследования

Объектом исследования являются высокоресурсные утилизационные камеры для сжигания нефтяных и других техногенных газов. Для получения геометрического облика и режимных параметров камеры использованы методики, разработанные в подразделениях ФГБОУ ВПО: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ; Московский национальный исследовательский технический университет – МАИ; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана; Пермский национальный исследовательский политехнический университет - ПНИПУ.

При численном моделировании рабочего процесса использован коммерческий программный комплекс ANSYS Fluent и дополнительно разработанная программа для зоны горения.

В экспериментальных исследованиях процессов горения использовались аттестованные приборы для измерения расходов (ГОСТ Р 50193.3-92), температуры (ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ) и давления (ГОСТ 22520-85) и аттестованные газоанализаторы (ГОСТ 13320-81).

Положения и выводы, выносимые на защиту

1. Анализ составов, пределов горения ПНГ и способы организации устойчивого рабочего процесса в универсальной КС.
2. Методика определения режимных, геометрических и тепловых параметров утилизационных КС как подсистем ГТУ.
3. Результаты теоретического моделирования процессов горения ПНГ и их верификация с экспериментальными данными.
4. Рекомендации по увеличению ресурса работы утилизационной КС при сжигании забалластированных, серо- и конденсатосодержащих нефтяных и других техногенных газов.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью постановки задач, использованием современных математических методов и программных комплексов для решения задач турбулентного течения и горения в объеме утилизационной камеры, удовлетворительным соответствием полученных расчетных и экспериментальных данных, опубликованным расчетным и экспериментальным данным.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «Протон-ПМ» (Пермь, 21-22 ноября 2012);
- научно – техническая конференция «Фундаментальная наука и технологии – перспективы разработки» (Москва, 22-23 мая 2013г);

- научно-техническая конференция молодых специалистов НПО «ИСКРА» (Пермь, 25.10.2013 г.);
- XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника. Высокие технологии и инновации – 2013» (Пермь, 20-21 ноября 2013 г.);
- VII Всероссийская (с международным участием) научно-техническая интернет-конференция «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» (Пермь, 01.11.2013 – 30.11.2013 г.);
- VIII Всероссийская (с международным участием) научно-техническая интернет – конференция «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» » (Пермь, 01.11.2014 – 30.11.2014 г.);

Работа отмечена дипломами:

- диплом 2 степени на открытом конкурсе молодежных инновационных проектов ПНИПУ «Большая разведка» , выдан 24 мая 2012 г.;
- диплом победителя на студенческом региональном конкурсе инновационных проектов У.М.Н.И.К., выдан 29 ноября 2012 г.;
- диплом 2 степени на научно-технической конференции молодых специалистов НПО «ИСКРА», выдан 25.10.2013 г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе, 2 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в журналах, индексируемых в Scopus, 1 статья – в Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Объем диссертации составляет 146 страниц. В работе содержатся 10 таблиц, 47 рисунков и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, дана краткая характеристика полученных результатов работы.

Первая глава посвящена информационно – аналитическому обзору по проблемам утилизации ПНГ. На сегодняшний день существуют следующие способы использования ПНГ, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки: переработка в сырье для нефтехимической промышленности; обратная закачка в пласт для интенсификации добычи; «газлифт» - газ закачивается в скважину; транспортировка газа на нефтеперерабатывающие заводы; закачка газа во временные подземные хранилища; переработка газа по GTL-технологии (метод Фишера – Тропша); использование в качестве топлива для работы ГТУ. По нашему мнению, наиболее рациональным способом является утилизация ПНГ в КС ГТУ с целью получения электрической и тепловой энергии.

Применение данного способа также сопровождается некоторыми сложностями. Состав ПНГ на разных месторождениях и даже на одном месторождении в процессе эксплуатации является переменным, что негативно сказывается на устойчивости горения. В данной работе для обеспечения стабильного горения разнородных по составу ПНГ в КС предлагается многозонная КС, где в зоне первичного воздуха происходит устойчивое горение забалластированных газов сложного состава, а в зонах вторичного воздуха обеспечивается заданный уровень температуры газа перед турбиной.

Для сокращения затрат на экспериментальную доводку КС требуется численное моделирование рабочего процесса, близкого или совпадающего с реальными условиями эксплуатации ГТУ. Анализ показал, что при использовании готовых программных комплексов типа ANSYS и Flow Vision требуется использование дополнительных уравнений рабочего процесса в зоне горения.

Также необходимо определиться с моделированием турбулентного течения, которое можно разделить на три категории: прямое численное моделирование (*DNS* - direct numerical simulation), моделирование крупномасштабных вихрей (*LES* - large eddy simulation) и осредненные по Рейнольдсу или Фавору стационарные (*SRANS* - Steady Reynolds-averaged Navier-Stokes) и нестационарные (*URANS* - Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) уравнения Навье-Стокса. На данном этапе разработки универсальной КС был использован стационарный метод *SRANS*, позволяющий достаточно точно рассчитать стационарные характеристики потока. Такой расчет будет

наиболее экономичен по расчетной сетке и потребует минимальных затрат времени.

Большинство математических моделей, применяемых для моделирования процесса горения, можно разделить на два класса: модели кинетического горения, описывающие горение заранее перемешанной топливо-воздушной смеси, и модели, описывающие процесс диффузионного горения.

Также модели горения подразделяются по скорости протекания химической реакции: модель Зельдовича, кинетическая модель горения, турбулентная модель горения; пульсационная модель горения, модель 'ЭДС' (Eddy Dissipation Concept - концепция распада вихрей). В данной работе применялась турбулентная модель горения, в которой скорость брутто-реакции определяется скоростью турбулентного смешения (модель Магнуссена).

Во второй главе обоснована необходимость разработки универсальной КС как подсистемы отечественной ГТУ блочно – модульного типа для утилизации разнородных по составу и теплотворной способности забалластированных ПНГ.

Из-за отсутствия отечественных аналогов нефтедобывающие компании вынуждены закупать и устанавливать на малодебитных месторождениях для утилизации ПНГ зарубежные установки типа С-65 и С-200 производства фирмы Capstone, предназначенные для получения резервной электрической или тепловой энергии при сжигании метана, пропана и природного газа. Подобные установки выходят из строя, отработав 20 - 25 % от заявленного ресурса. После аварийного останова при эксплуатации на месторождении «Шемети-2» Пермского края установки С-65 были проведены дефектация, фрактографический и рентгеноспектральный анализ ее ДСЕ, представленных на рисунке 1.

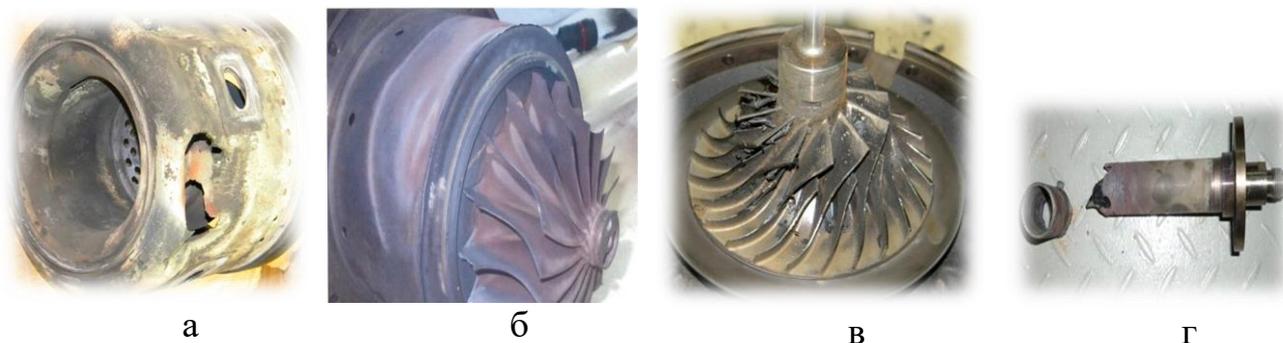


Рисунок 1 – Основные узлы установки С – 65 после ее дефектации
а – КС; б – колесо турбины; в – колесо компрессора; г - инжектор

Рентгеноспектральный анализ рабочего колеса компрессора показал, что в образце содержится 46,39 % кислорода, 27,71 % углерода, 8,79 % серы, 7,18 % железа, 1,91 % кремния, 1,29 % кальция, 1,10 % калия и менее 1 % никеля и хрома. Попадание серосодержащих ПС на лопатки рабочего колеса компрессора объясняется обратным потоком газа из КС по «горячему» тракту рекуператора, который возникает в результате неустойчивости рабочего процесса и приводит к помпажу компрессора. Попадание в область неустойчивости (рисунок 2) вызвано несоответствием времен преобразования ПНГ и природного газа в ПС. Время преобразования ПНГ в ПС гарантированно выше аналогичного показателя для метана, пропана или природного газа.

Кроме того, в процессе эксплуатации ГТУ на различных режимах работы расходы окислителя и горючего могут значительно отличаться от своих номинальных значений.

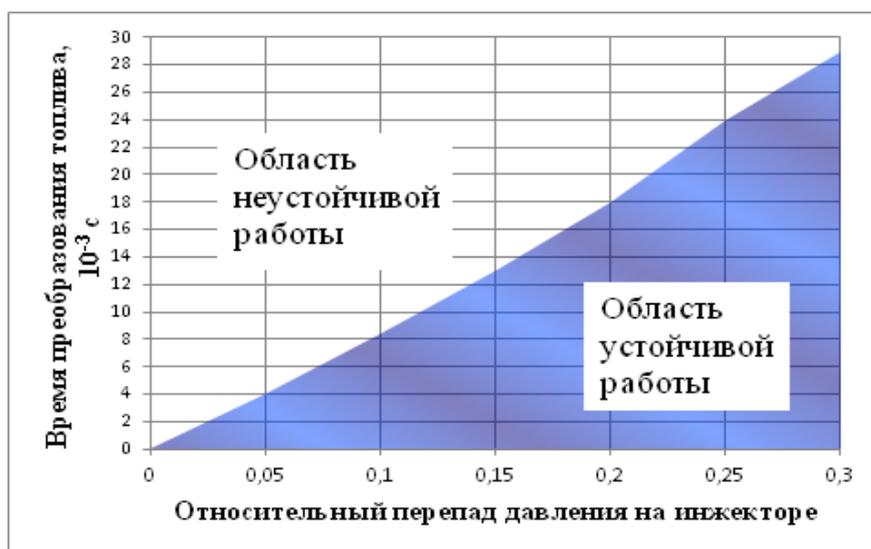


Рисунок 2 – Граница устойчивости рабочего процесса в КС установки С-65

Это обстоятельство может привести к форсированному режиму работы КС с повышением температуры до 2350°С. Поток ПС с такой температурой может вызвать прогар стенок КС и способствовать разрушению рабочих лопаток турбины и конструктивных элементов рекуператора.

Для определения режимных параметров универсальной КС были проведены анализ составов ПНГ, термохимические и термодинамические расчеты горения ПНГ пятнадцати месторождений Пермского края. В таблице 1 приведены составы ПНГ с максимальным содержанием балластирующих компонентов, тяжелых углеводородов и сероводорода. Термохимические расчеты учитывают состояние ПНГ (наличие влаги, конденсата тяжелых углеводородов, балластирующих компонентов, сероводорода) и условия его подачи в КС (температура, давление).

Составы и параметры Таблица 1 – Компонентные составы ПНГ

ПС при сжигании ПНГ определялись в процессе термодинамического расчета с использованием программного комплекса «АСТРА.4». В результате были получены температура горения, теплофизические характеристики и составы ПС при различных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Анализ состава ПС показал, что максимальное содержание серосодержащих соединений может достигать 23,9 мг/м³.

Состав и параметры	Компонентный состав ПНГ месторождений Пермского края, об. %		
	Гожан-1	Ярино	Шемети-2
N_2	40,03	2,57	36,31
CO_2	0,90	0,61	1,30
CH_4	18,68	13,72	22,14
C_2H_6	15,18	29,51	12,72
C_3H_8	15,92	29,00	17,46
iC_4H_{10}	2,89	4,17	2,51
C_4H_{10}	4,49	10,43	5,28
iC_5H_{12}	0,91	4,83	0,82
C_5H_{12}	0,38	4,04	0,42
C_6H_{14}	0,32	1,07	0,38
H_2S	0,3	0,05	0,66
He	0,04	-	0,01
K_{m0}	14,84	15,34	14,89
$Q_H, \text{МДж/м}^3$	35,0	48,2	45,3

С помощью метода Ле Шателье определены концентрационные пределы горения разнородных по составу ПНГ различных месторождений. Показано, что содержание балластирующих компонентов до 38 % в составе ПНГ приводит к уменьшению диапазона устойчивого горения горючей части ПНГ по α на 41 %, а подогрев топливного газа до 160 °С– к его увеличению на 9 %.

Было рассмотрено семь основных вариантов комплектации ГТУ из готовых покупных изделий, с указанием технических и стоимостных показателей каждого варианта. В результате анализа технических и стоимостных параметров ГТУ и рынка основных ее агрегатов сделан вывод о том, что с технической, маркетинговой и экономической точек зрения наиболее предпочтительной для практической реализации является одновальная редукторная схема блочно-модульной ГТУ номинальной мощностью 145 кВт с готовыми низкооборотным электрогенератором, турбокомпрессором и редуктором, принципиальная схема которой приведена на рисунке 3.

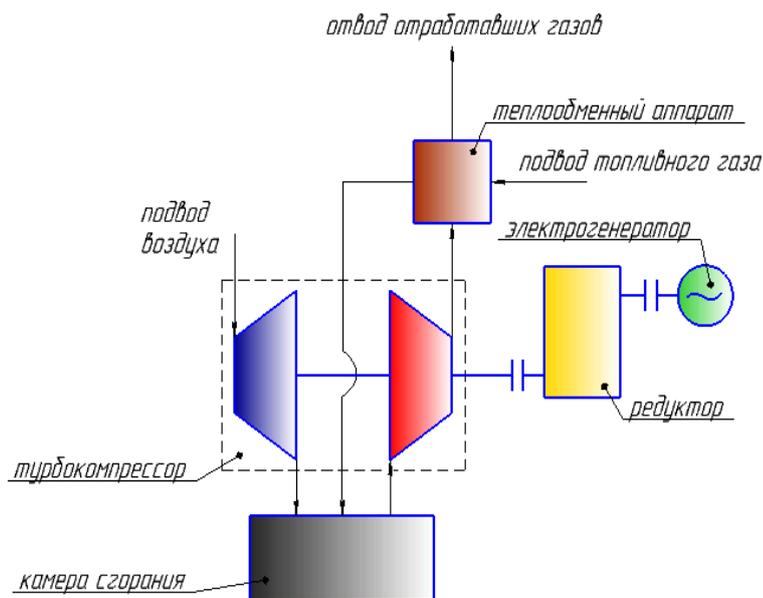


Рисунок 3 – Принципиальная схема одновальной редукторной ГТУ

В ГТУ значение температуры газа перед неохлаждаемой турбиной принимается обычно (700 – 950) °С по условиям работоспособности ДСЕ турбины. Поскольку при таких условиях становится невозможной качественная организация процесса устойчивого горения, то для собственно горения топливного газа необходимо

выделить зону первичного воздуха, обеспечивающую условия устойчивого горения разнородных по составу ПНГ. Вторичный воздух, минуя зону горения, через ряды отверстий подается в зоны разбавления, где при смешивании с основным потоком обеспечивает заданный уровень температуры газов перед турбиной (рисунок 4). В качестве зоны горения использована серийная диффузионная горелка ГДК-0,6Д, с термобетонной стенкой и коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,08$, при котором обеспечивается устойчивое горение ПНГ различных месторождений.

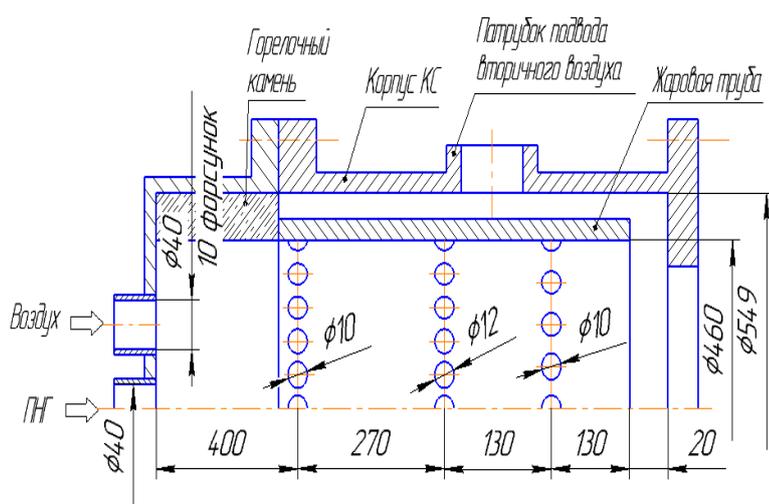


Рисунок 4 – Принципиальная схема многозонной КС

Режимные параметры универсальной КС (таблица 2) были определены с учетом выходных параметров энергоустановки и данных терморасчетов. Была проведена серия расчетов для определения различных вариантов геометрического облика универсальной КС для сжигания ПНГ

($l_{\text{жст}}/d_{\text{жст}} = 1,08 \dots 3,66$; $\theta = 0,1 \dots 0,3$; $d_{\text{жст}} = (0,42 \dots 0,46)$ м) и их сравнение с

обликами имеющихся КС авиационных, транспортных и стационарных газотурбинных двигателей и ГТУ. Для дальнейших разработок была рекомендована выносная многозонная КС с использованием в зоне горения серийной горелки, неравномерностью температурного поля на выходе $\theta = 0,17$, отношением длины ЖТ к ее диаметру $l_{жт}/d_{жт} = 2,072$ и объемной теплонапряженностью $H = 21,0$ Дж/(м³ · с · Па).

Таблица 2 – Режимные параметры универсальной КС

Параметр	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5
Массовый расход топливного газа, кг/с	0,024	-	-	-	-
Массовый расход воздуха, кг/с	0,386	1,044	0,537	0,465	0,107
Коэффициент избытка воздуха	1,08	4	5,5	6,8	7,1
Температура, К	2386	1223	1125	984	973

Для снижения концентрации коррозионно - активных веществ и образования антикоррозионной пленки на поверхности конструкционных материалов целесообразно применение антикоррозионных добавок в составе топливного газа на входе в КС ГТУ. В таблице 3 показаны расчетные концентрации серосодержащих веществ в составе ПС при использовании присадки типа анилин. Использование присадок с массовой долей до 0,1 % снижает концентрацию серосодержащих коррозионно-активных веществ более чем на 10 %.

Таблица 3 – Влияние присадки анилин на концентрацию серосодержащих веществ

$\sigma_{т\delta}$, %	0	0,01		0,1		0,5	
Формула вещества	C_0 , ppm	C , ppm	δ_C , %	C , ppm	δ_C , %	C , ppm	δ_C , %
SO_2	$1,517 \cdot 10^5$	$1,359 \cdot 10^5$	-10,40	$1,354 \cdot 10^5$	-10,73	$1,349 \cdot 10^5$	-11,07
SO_3	44,2	39,926	-9,67	39,873	-9,79	39,674	-10,24
H_2SO_4	$1,271 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	-5,38	$1,198 \cdot 10^{-2}$	-5,71	$1,194 \cdot 10^{-2}$	-6,04

Параметры теплового состояния стенки и ПС, а также состав ПС позволили сформулировать рекомендации по выбору конструкционных материалов. Для изготовления конструктивных элементов КС предложено использование жаропрочных хромоникелевых сплавов с $\chi = 1,13 \dots 1,63$, где χ - отношение содержаний никеля и хрома в материале.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующую методику проектирования универсальной КС.

1. Определение режимных параметров КС как подсистемы ГТУ.
2. Определение концентрационных пределов горения по α для разнородных по составу и теплотворной способности ПНГ различных месторождений.
3. Определение универсального диапазона концентрационных пределов горения для ПНГ различных месторождений.
4. Выбор универсального значения α в зоне горения из общей области устойчивого горения.
5. Выбор ПНГ с максимальным содержанием сероводорода, балластирующих компонентов, тяжелых углеводородов в качестве номинального топливного газа.
6. Проведение термодинамических расчетов с целью определения параметров горения и состава ПС при различных α .
7. Определение α в выходном сечении КС по температуре ПС на входе в сопловой аппарат турбины и выбор линейного распределения α по длине ЖТ.
8. Определение геометрических параметров КС
 - а) основные параметры (длина, диаметр) рассчитываются с учетом неравномерности температурного поля на входе в сопловой аппарат турбины;
 - б) параметры узлов подвода вторичного воздуха определяются с использованием соотношения скоростных напоров радиального и осевого потоков и проверкой глубины проникновения струи вторичного воздуха.
9. Определение теплового состояния конструктивных элементов КС в характерных сечениях по длине с использованием уравнения теплового баланса.
10. Выбор конструкционных материалов элементов КС по параметрам теплового состояния стенки и ПС, а также по составу ПС.

11. Численное моделирование рабочего процесса с целью его оптимизации для увеличения ресурса работы КС.

В третьей главе рассмотрена система уравнений рабочего процесса в утилизационной КС, включающая в себя уравнения в частных производных и алгебраические уравнения, описывающие трехмерное турбулентное течение с горением. В результате решения этой системы можно получить распределения трех компонент скорости, давления, температуры, турбулентных характеристик, коэффициента избытка воздуха, концентраций окислителя, горючего и ПС по объему КС.

Скорость горения топливного газа зависит от скорости турбулентного смешения в масштабе турбулентных пульсаций и химико-кинетического взаимодействия горючего с окислителем и определяется по уравнению

$$W_T = A_w \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ C_z, \frac{C_o}{K_{m0}} \right\},$$

где C_o - концентрация окислителя в топливовоздушной смеси; K_{m0} - стехиометрическое массовое соотношение компонентов; k - кинетическая энергия турбулентности; ε - скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; A_w - константа скорости турбулентного горения.

Расчет турбулентных характеристик проводился по $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

Результаты численного моделирования, приведенные в главе 4, получены с использованием программного комплекса ANSYS Fluent (поля течения, давления, температур, параметра смешения, концентраций веществ в составе ПС, стандартные граничные условия) с применением дополнительно разработанной программы (концентрации горючего C_r , окислителя C_o , ПС $C_{пс}$, коэффициента избытка воздуха α). Значения α , $C_{пс}$, C_o определялись по алгебраическим соотношениям, а значения C_r получены в результате численного решения уравнения в частных производных по дополнительно разработанной программе.

В главе 4 приведены результаты численного моделирования параметров рабочего процесса по объему полноразмерной КС и модельной горелки. Результаты численного моделирования представлены в виде полей и радиальных профилей в характерных сечениях по оси КС (1 – входное сечение,

$x=0$ м; 2 – зона развитого горения, $x=0,3$ м; 3 – выходное сечение, $x=1,053$ м). На рисунке 5 представлены линии тока в продольном сечении и радиальные профили полной скорости

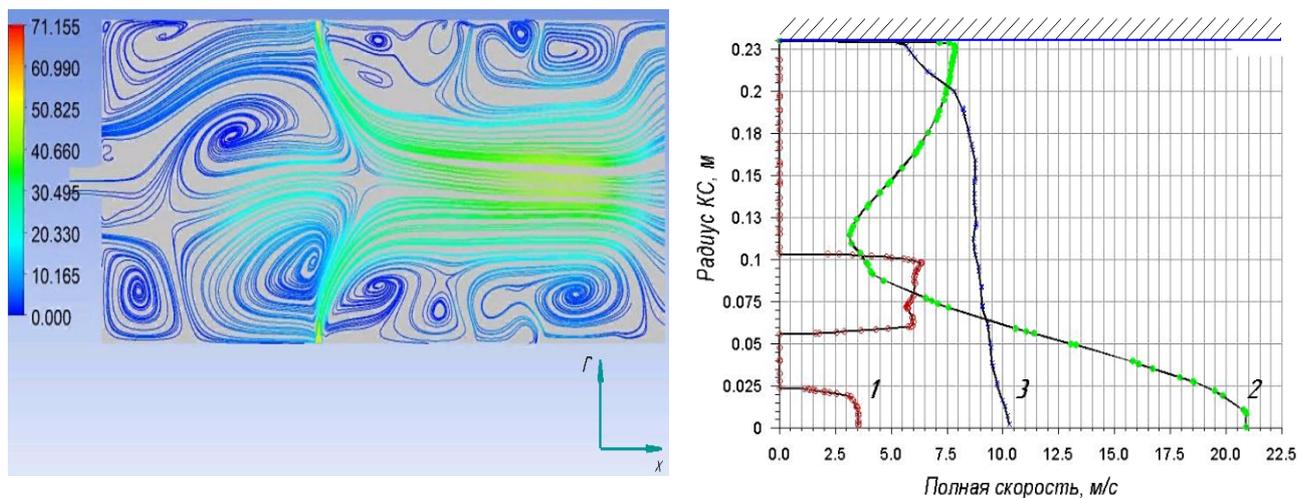


Рисунок 5 – Линии тока в продольном сечении и радиальные профили полной скорости

Анализ течения показал, что в зоне развитого горения наблюдаются сильные обратные токи, способствующие аэродинамической стабилизации пламени и выносу тепла из зоны реакции к свежей топливо-воздушной смеси. В выходном сечении профиль является сильно наполненным, что свидетельствует о развитом турбулентном течении ($Re \sim 33000$).

На рисунке 6 приведены профили температуры в объеме КС и коэффициента избытка воздуха в зоне горения.

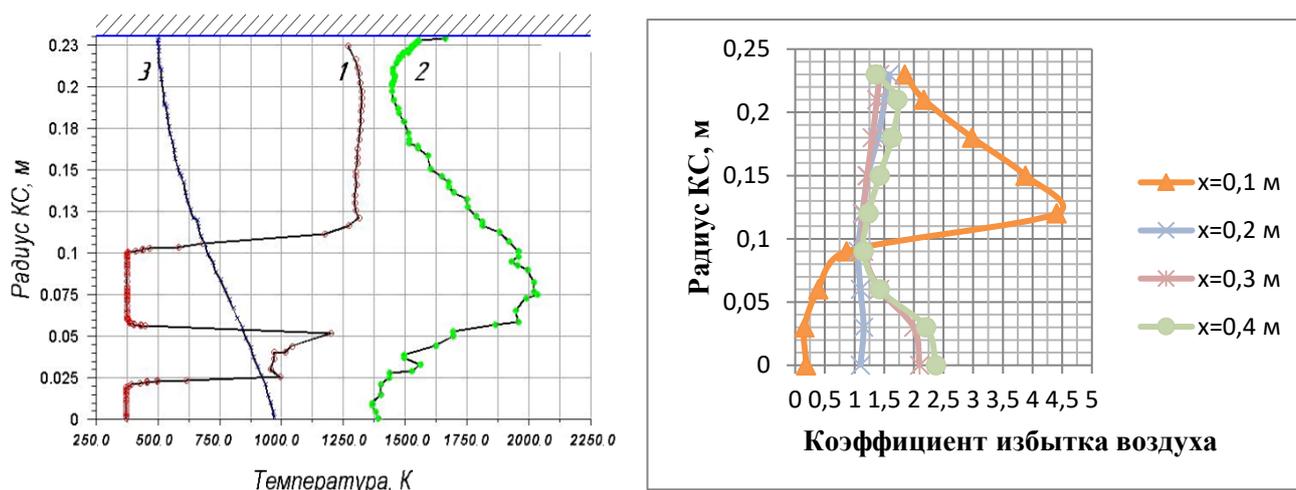


Рисунок 6 – Профили температуры и коэффициента избытка воздуха

В области форсунок смесительной головки температура газа определяется условиями подвода компонентов в зону горения КС. В пристеночной области

форсуночной головки температура газа превышает 1000 К, что объясняется выносом тепла из зоны горения развитыми обратными токами.

В результате серии расчетов с использованием ANSYS Fluent выполнен подбор параметров подачи вторичного воздуха (расход, перепад давления, размеры и количество отверстий), который позволил локализовать пламя в центральной области камеры как в радиальном, так и в осевом направлениях. Это способствует понижению температуры газа в пристеночной зоне и повышению ресурса работы КС.

В выходном сечении максимальная температура потока составляет ~1000 К, что не противоречит условию работоспособности сопловых и рабочих лопаток турбины.

В области форсунок окислителя наблюдается обедненная смесь ($\alpha > 1$), а в области форсунки горючего - обогащенная смесь ($\alpha < 1$). По мере удаления от смесительной головки радиальный профиль коэффициента выравнивается и во всем объеме КС наблюдается обеднение смеси. В зоне развитого горения состав смеси приближается к стехиометрическому и при горении достигается максимальная температура.

Проведено описание испытательного стенда по изучению характеристик горения техногенных газов. Из-за отсутствия газгольдера экспериментальные данные по горению забалластированного ПНГ сложного состава (месторождение «Шемети-2» Пермского края) получены при его сжигании в модельной горелке с подачей газа из баллонов. Экспериментально подтверждена устойчивость и определены температуры горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,27 \dots 4,65$, где α определялся по параметрам подачи компонентов на входе в горелку. Температура в зоне горения определялась с помощью хромель-алюмелевой термопары, установленной на оси в 15 мм от устья горелки. Для определения концентрации серосодержащих соединений в составе ПС использовался газоанализатор Testo – 340. Отбор проб проводился в выхлопной трубе на расстоянии 2,2 м. от выходного сечения горелки при температуре (450 – 500) °С.

Для верификации теоретических и экспериментальных результатов проведено численное моделирование процесса горения ПНГ в модельной горелке. На рисунке 7 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры и концентрации SO₂.

Отличие расчетной от экспериментальной температуры на оси горелки составило 8 %, что говорит о правильном выборе технических решений при разработке универсальной КС.

Наибольшая концентрация наиболее коррозионно-активного SO_2 составила $3,2 \cdot 10^{-6}$ кмоль/м³ или 0,042 масс. % при $\alpha = 0,48$. Максимальная погрешность между экспериментальными и расчетными данными составляет 13 % при $\alpha = 4,65$.

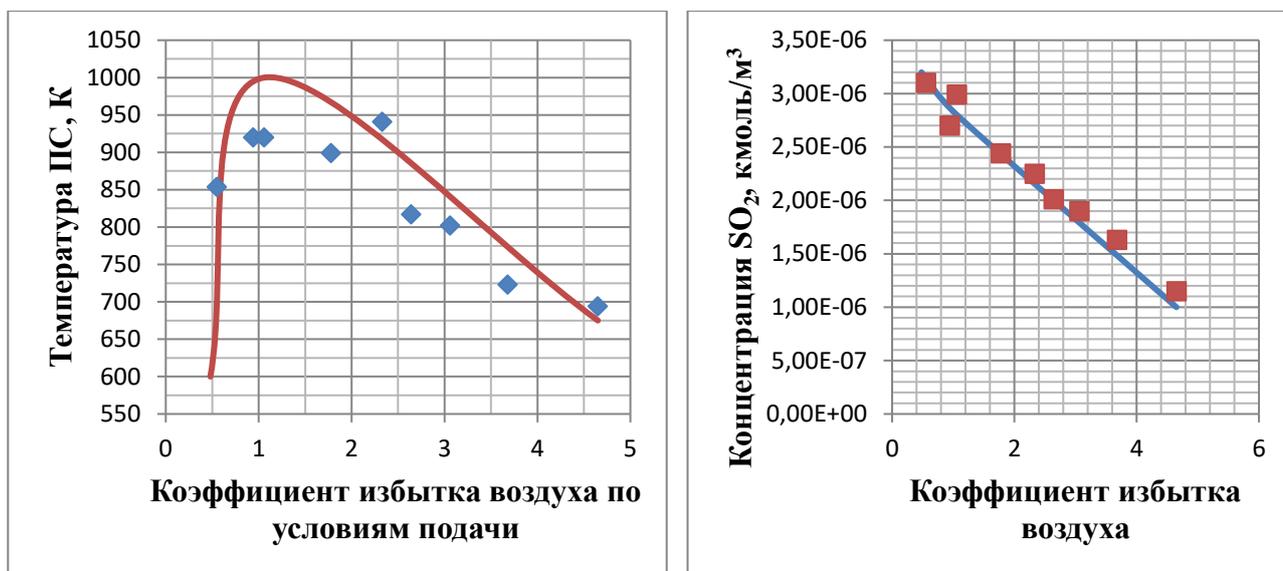


Рисунок 7 – Результаты экспериментальных исследований горения ПНГ

На основе теоретических и экспериментальных исследований сформулированы следующие практические рекомендации по повышению ресурса работы (45000 часов, капитальный ремонт 25000 часов) утилизационных КС.

1. В универсальной многозонной КС, предназначенной для утилизации разнородных по составу ПНГ, коэффициент избытка воздуха в зоне горения должен иметь универсальное значение, общее для диапазонов концентрационных пределов горения ПНГ различных месторождений. Для разработанной КС таким значением является $\alpha=1,08$.

2. В реальных условиях эксплуатации универсальной многозонной КС контрольно-регулирующая аппаратура должна обеспечивать параметры подачи (давления, температуры, расходы) таким образом, чтобы в зоне горения были реализованы режимы с $\alpha=0,29 \dots 1,28$.

3. Численное моделирование рабочего процесса многозонной КС показало, что подбором условий подачи вторичного воздуха возможна локализация фронта пламени на некотором удалении от боковых стенок и

выходного сечения. Это способствует уменьшению температуры в пристеночной зоне до 1650 К при температуре в зоне развитого горения ~2000 К и уменьшению концентрации серосодержащих соединений в пристеночной зоне до 0,3 масс. %.

4. На основании полученных данных по условиям работы конструкционных материалов при сжигании ПНГ, с одной стороны, и обзора имеющихся данных по условиям применения материалов, с другой стороны, предлагается применение хромоникелевых сплавов с $\chi = 1,13 \dots 1,63$ (χ - отношение содержания никеля и хрома в материале) Изготовление ДСЕ КС толщиной 3-4 мм обеспечивает ресурс работы установки 4-5 лет.

5. Исследования показали, что для увеличения ресурса работы целесообразно применение антикоррозионных присадок. Присадки типа анилин в количестве до 0,1 масс. % снижают концентрацию серосодержащих веществ более чем на 10 %, при этом потребный годовой запас добавок составляет до 1000 кг/год.

6. Для исключения конденсированных фракций тяжелых углеводородов из состава ПНГ целесообразно применение теплообменника на входе в КС в составе ГТУ. Расчеты показали, что при условиях эксплуатации на малодебитных месторождениях достаточно подогреть ПНГ до 160 °С.

Заключение

1. Проведен информационно-аналитический обзор по проблемам утилизации серосодержащих, забалластированных, разнородных по составу ПНГ на малодебитных месторождениях, показавший нерешенность проблемы и позволивший сформулировать основные задачи исследования.

2. На основе анализа причин аварийного останова импортных энергоустановок и составов ПНГ на малодебитных месторождениях разработана методика проектирования универсальной КС для утилизации разнородных по составу нефтяных и техногенных газов с содержанием балластирующих компонентов до 40 %.

3. Предложена конструкция универсальной многозонной КС в составе отечественных ГТУ блочно-модульного типа, обеспечивающая устойчивость рабочего процесса и высокий ресурс при утилизации разнородных по составу

нефтяных и техногенных газов. Для энергоустановки мощностью 145 кВт разработана конструкторская документация.

4. Реализовано численное моделирование рабочего процесса в объеме полноразмерной КС и модельной горелки с использованием программного комплекса ANSYS Fluent и дополнительно разработанной программы для зоны горения с целью оптимизации рабочего процесса в КС.

5. Получены экспериментальные данные по параметрам горения ПНГ и концентрациям серосодержащих соединений в составе ПС при режимах горения с $\alpha = 0,27...4,65$ в модельной горелке. Верификация численных и экспериментальных данных показала правильность принятых технических решений при разработке универсальных высокоресурсных КС.

6. Сформулированы практические рекомендации по обеспечению высокого ресурса работы утилизационных КС в составе отечественных ГТУ блочно – модульного типа на малодобитных месторождениях (45000 часов, капитальный ремонт 25000 часов).

7. Перспективы дальнейших разработок темы связаны с созданием модельного ряда универсальных утилизационных КС различной мощности по предложенной методике.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

***Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах,
определенных ВАК***

1. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Способы увеличения ресурса работы микрогазотурбинного энергетического агрегата при утилизации попутного нефтяного газа / О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, А. М. Клещевников // Газовая промышленность. – 2013. – № 692, спецвыпуск. – С. 30-34.

2. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Выбор геометрических, режимных и тепловых параметров высокоресурсной камеры сгорания для утилизации ПНГ / О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, А. М. Клещевников // Газовая промышленность. – 2013. – № 698. – С. 94-97.

3. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Разработка газотурбинной установки для утилизации нефтяного газа с выработкой электрической и тепловой энергии на малодобитных месторождениях / О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, А. М. Клещевников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Вып. 1084. – С. 98-101.

Переводная версия: Zueva, O. A., Bachev, N. L., Bulbovich, R. V., Kleschevnikov, A. M. Development of a gas turbine plant for associated petroleum gas utilization gathering electrical and thermal energy at marginal fields (2014) Neftyanoe Khozyaistvo - Oil Industry, Issue 1, pp. 98-101 (SCOPUS).

4. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Пределы устойчивого горения нефтяных газов // О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Вып. 1089. – С. 64-66.

Переводная версия: Zueva, O. A., Bachev, N. L., Bulbovich, R. V. Limits of stable combustion of petroleum gases (2014) Neftyanoe Khozyaistvo - Oil Industry, Issue 6, pp. 64-66 (SCOPUS).

5. Бетинская, О. А. Трехмерная модель исследования рабочего процесса в камере сгорания для утилизации нефтяного газа / О. А. Бетинская, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович // Нефтяное хозяйство. – 2015. – Вып. 1097. – С. 96-99.

Переводная версия: Betinskaya, O. A., Bachev, N. L., Bulbovich, R. V. Three-dimensional model study of the working process in the combustion chamber for utilization of petroleum gas (2015) Neftyanoe Khozyaistvo - Oil Industry, Issue 2, pp. 96-99 (SCOPUS).

6. Бетинская, О. А. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / Н. Л. Бачев, О. А. Бетинская, Р. В. Бульбович // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, №1. – С. 212-220.

Переводная версия: Bachev, N.L., Betinskaya, O.A., Bul'bovich, R.V. Computational Modeling of the Working Process in the Combustion Chamber for Casing-Head Gas Recovery (2016) Journal of Engineering Physics and Thermophysics, pp. 1-9. (Web of Science).

Другие публикации

7. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Расчет выбросов загрязняющих и коррозионно- активных веществ при сжигании серосодержащего попутного нефтяного газа в микрогазотурбинных энергетических агрегатах / О. А. Зуева, Р. В. Бульбович, Н.Ю. Бачева // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. – №32. – С. 81-95.

8. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Выбор геометрических и режимных параметров камеры сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / О. А.

Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, А. М. Клещевников // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2013. – №34. – С. 40-51.

9. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Теплообмен в камере сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, А. М. Клещевников // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2013. – №34. – С. 52 - 63.

10. Бетинская, О. А. (Зуева О. А.) Концентрационные пределы горения попутных нефтяных газов / О. А. Зуева // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – №37. – С. 140-153.

11. Бетинская, О. А. Стационарная трехмерная модель горения топливных газов / Н. Л. Бачев, О. А. Бетинская, Р. В. Бульбович // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2015. – №41. – С. 103-119.

12. Зуева, О. А. Разработка высокоресурсной камеры сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки : (Москва, 22-23 мая 2013 г.). – М., 2013. – Т. 2. – С. 167- 172.

13. Зуева, О. А. Выбор режимных и геометрических параметров камеры сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, А. М. Клещевников // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: тезисы докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции (Пермь, 20-21 ноября 2013 г.). – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2014. – С. 56-58.

14. Зуева, О. А. Алгоритм трехмерного моделирования внутрикамерных процессов при сжигании топливных газов / Н. Л. Бачев, О. А. Зуева, Н. Ю. Бачева // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: тезисы докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции (Пермь, 20-21 ноября 2013 г.). – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2014. – С. 18-19.

15. Зуева, О. А. Разработка газотурбинной установки для утилизации древесных отходов с выработкой электрической и тепловой энергии / М. И. Мазихин, Н. Л. Бачев, Н. Ю. Бачева, О. А. Зуева // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: тезисы докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции (Пермь, 20-21 ноября 2013 г.). – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2014. – С. 79-81.

16. Зуева, О. А. Проект микрогазотурбинного энергетического агрегата на попутном газе / А. М. Клещевников, В. М. Кузнецов, О. А. Зуева // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: тезисы докладов VII Всероссийской (с международным участием) научно-технической интернет-конференции (Пермь, 1-30 ноября 2013 г.). – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2013. – С. 24-30.

17. Зуева, О. А. Решение вопросов стабильности работы энергетического оборудования при использовании неподготовленного нефтяного попутного газа и других техногенных топлив / А. М. Клещевников, О. А. Зуева, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: тезисы докладов VIII Всероссийской (с международным участием) научно-технической интернет-конференции (Пермь, 1-30 ноября 2014 г.). – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2014. – С. 38-52.