

На правах рукописи



Гриша Бронислав Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА
ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СЖИГАНИИ СЫРОЙ
НЕФТИ**

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре моделирования и проектирования энергетических установок федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Росляков Павел Васильевич**
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор кафедры МиПЭУ ФГБОУ ВО «НИУ
«МЭИ», г. Москва

Официальные оппоненты: **Григорьев Константин Анатольевич**
доктор технических наук,
главный научный сотрудник Открытого
Акционерного Общества «Научно-
производственного объединения по
исследованию и проектированию
энергетического оборудования
им. И.И. Ползунова (ОАО «НПО ЦКТИ»),
г. Санкт-Петербург

Жуков Евгений Борисович
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Котло- и
реакторостроение» федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Алтайского
государственного технического университета
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового
Красного Знамени Теплотехнический научно-
исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),
г. Москва

Защита состоится «08» декабря 2021 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.006 в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, зал Ученого Совета НИУ «МЭИ»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «НИУ «МЭИ» и на сайте: www.mpei.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МЭИ.006
к.т.н. доцент



О.В. Егошина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» предусмотрено создание и организация серийного производства установок малой энергетики в связи с резко возросшим в последние годы интересом к малогабаритным водогрейным котлам в системах автономного теплоснабжения. В настоящее время теплоснабжение России, кроме крупных ТЭЦ, обеспечивают около 2,9 тыс. котельных общей мощностью более 20 Гкал/час и более 77 тысяч мелких котельных, на которых установлены паровые и водогрейные котлы малой мощности (до 5 МВт). Такие котлы широко используются в котельных не только в ЖКХ, но и в других отраслях промышленности: нефтедобыча и ее транспортировка, химия, металлургия, сельское хозяйство и пр.

Для этих целей в настоящий момент достаточно большими темпами идёт внедрение жаротрубных водогрейных котлов. В последние годы на российском рынке жаротрубных котлов все чаще стали появляться отечественные производители. Однако большинство из них производятся ведущими европейскими производителями.

В связи с принятым Правительством РФ направлением на импортозамещение и создание отечественного эффективного энергетического оборудования тема настоящей работы, в рамках которой впервые разработан и исследован новый отечественный энергоэффективный жаротрубный котел с выносным экономайзером на сырой нефти для его серийного производства на российских предприятиях, является весьма актуальной. Разработанные котлы в составе блочно-модульных котельных (БМК) планируется использовать в качестве автономных энергоэффективных источников теплоснабжения объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, а также предприятий и населенных пунктов в районах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, испытывающих дефицит традиционных энергетических топлив.

Степень разработанности темы.

Исследованиями в области разработки жаротрубных котлов малой мощности в разное время занимались различные организации, в частности ОАО «НПО ЦКТИ», «Фирма ОРГРЭС», ВНИИпромгаз, Томский политехнический университет. Однако в последние 20 лет работы по созданию отечественных современных жаротрубных котлов в России практически не велись. В результате в настоящее время на российском рынке преобладают жаротрубные котлы зарубежных фирм.

Основное направление исследований в данной работе связано с выполнением инвариантных теплогидравлических расчетов в программном комплексе Boiler Designer, аэродинамических расчетов в программной среде ANSYS CFX и экспериментальных исследований на опытных образцах. Компьютерное моделирование в настоящее время широко и успешно применяется для изучения разных сложных тепломассообменных процессов.

Использование такого подхода позволяет оптимизировать схемы компоновки, конструкции котла и выносного экономайзера и снизить сопротивления газовоздушного и водяного трактов, а также размеры их элементов для размещения в ограниченных габаритах блочно-модульных котельных.

Целью работы является разработка, создание и исследование новой конструкции российского энергоэффективного жаротрубного котла с выносным экономайзером для работы на сырой нефти, позволяющая обеспечить КПД не менее 94% и пониженную низкотемпературную сернистую коррозию.

В этой связи в работе решались следующие задачи:

– разработка и расчетные исследования различных вариантов компоновочных и принципиальных конструкторских решений энергоэффективного жаротрубного котла с выносным экономайзером, позволяющие исключить низкотемпературную коррозию котельных поверхностей при сжигании сернистых топлив и обеспечивающие существенное повышение КПД до 94%;

– разработка критериев для комплексного сравнения технико-экономических и конструктивных характеристик различных вариантов разрабатываемого жаротрубного водогрейного котла;

– разработка и верификация компьютерной модели жаротрубного котла с выносным экономайзером при работе на сырой нефти для расчетного обоснования оптимальных конструкторских решений и определения его технико-экономических характеристик;

– разработка компьютерной модели и проведение численных исследований аэродинамики газового тракта выносного экономайзера с целью оптимизации конструкции газоходов и минимизации аэродинамического сопротивления газового тракта;

– экспериментальные исследования опытных образцов жаротрубных котлов с выносным экономайзером с целью определения их фактических технико-экономических характеристик.

Научная новизна

1. Разработана уточненная компьютерная модель теплогидравлических расчетов, учитывающая особенности теплообмена в жаротрубных котлах.

2. На базе многофакторных численных экспериментов и многовариантных тепловых и конструктивных расчетов научно обоснована и впервые предложена новая конструкция энергоэффективного жаротрубного котла с выносным экономайзером, работающего на сырой нефти, и позволяющая обеспечить КПД более 94 % и снизить скорость низкотемпературной сернистой коррозии.

3. С помощью численных экспериментов исследовано влияние конструкции газоходов выносного экономайзера на структуру и характеристики газовых потоков при обтекании поверхностей нагрева, позволившее минимизировать аэродинамическое сопротивление газового тракта.

4. Экспериментально подтвержден высокий КПД котлов с выносным экономайзером, который в при работе на сырой нефти в диапазоне рабочих нагрузок от 40 до 100% от номинальной теплопроизводительности составил соответственно свыше 96 и свыше 94,5%, что позволило уменьшить потребление топлива на 5–10 % по сравнению использованием существующего энергетического оборудования.

Методология и методы исследования, достоверность результатов.

Решение поставленных в работе задач осуществлялось путем проведения расчетных исследований, численных и натуральных экспериментов и детального анализа полученных результатов.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением апробированных и широко используемых программных продуктов, использованием утвержденных методик проведения испытаний и аттестованных измерительных приборов.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

Предложены критерии для комплексного сравнения технико-экономических и конструктивных характеристик различных вариантов разрабатываемого жаротрубного водогрейного котла.

Разработан, создан и прошел приемочные испытания высокоэффективный малогабаритный жаротрубный водогрейный котел с выносным экономайзером работающий на сырой нефти и резервных видах топлива с КПД более 94%.

Два опытно-промышленных образца разработанного котла с выносным экономайзером КВа-3,0 МЭ внедрены и успешно эксплуатируются в котельной ПАО «Транснефть» в г. Пермь.

На разработанный жаротрубный котел с выносным экономайзером разработана конструкторская документация и подготовлено его серийное производство на заводах системы «Транснефть».

Разработанные котлы в составе БМК могут быть использованы в качестве автономных энергоэффективных источников теплоснабжения предприятий и населенных пунктов в районах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, испытывающих дефицит традиционных энергетических топлив.

Положения, выносимые на защиту:

– новая конструкция энергоэффективного жаротрубного котла с выносным экономайзером для сжигания сырой нефти и резервных топлив с КПД не менее 94%;

– результаты расчетных исследований теплообменных, гидравлических и аэродинамических процессов жаротрубных котлов с выносным экономайзером, выполненных с целью оптимизации конструкции и улучшению технико-экономических характеристик

– результаты приемочных испытаний опытно-промышленных образцов разработанного котла.

Личный вклад автора заключается в:

– постановке задач исследования;

- анализе теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации;

- проведении численных и натурных исследований рабочих процессов при сжигании сырой нефти и альтернативных топлив;

- проведении приемочных испытаний опытно-промышленных образцов предложенного котла;

- анализе и обобщении полученных результатов;

- разработке новой конструкции энергоэффективного жаротрубного котла с выносным экономайзером, позволяющая обеспечить КПД более 94 % и снизить скорость низкотемпературной сернистой коррозии.

Публикации по работе. Основные результаты диссертационной работы изложены в 6 статьях в научно-технических изданиях (из них в изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science – 2, в журналах из перечня ВАК – 2, в изданиях, включенных в РИНЦ, – 2), 3 докладах в сборниках трудов научных конференций, 3 патентах РФ на изобретение, полезную модель и промышленный образец.

Апробация результатов. Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований докладывались и обсуждались на: Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов с международным участием «Современные технологии в энергетике» к 130-летию со дня рождения Л.К. Рамзина, г. Москва, 2017 г.; Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетике», г. Москва, 2017 г.; IV Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования», г. Москва, 2018 г.; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики, энергетике и гидрогазодинамики в условиях Арктики», г. Якутск, 2021 г.; заседаниях кафедры Моделирования и проектирования энергетических установок НИУ «МЭИ», 2016-2018 гг.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов по работе, списка использованной литературы, включающего 80 наименований. Работа содержит 141 страницу текста, 21 таблицу, 60 рисунков

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту и общие сведения по диссертационной работе.

В первой главе приведен обзор современных конструкций жаротрубных котлов малой мощности и рассмотрены особенности протекающих в них рабочих процессов. Анализ отечественных и зарубежных жаротрубных котлов выявил тенденции к минимизации их габаритных размеров с целью комплектации в составе блочно-модульных котельных (БМК) с возможностью беспрепятственного доступа персонала для ремонта и обслуживания.

На основе обзора современных жаротрубных котлов выявлены тенденции и пути совершенствования их конструкции, которые были положены в основу разрабатываемого энергоэффективного малогабаритного жаротрубного котла.

Во второй главе рассмотрены принципиальные конструктивные решения для водогрейного котла повышенной эффективности мощностью 3,0 МВт, использующего в качестве основного топлива сырую нефть с КПД не менее 94%. Дополнительными требованиями являлись ограниченные габариты, который вместе со вспомогательным оборудованием должен быть размещен в ограниченных размерах блочно-модульной котельной, и исключение низкотемпературной сернистой коррозии котельных поверхностей нагрева. В связи с этим впервые в российской практике было принято решение использовать предвключенный по воде выносной экономайзер, температура газов перед которым составляет около плюс 300°С, что обеспечивает уменьшение габаритов котла и устранение коррозии его поверхностей теплообмена.

Для обоснования предложенных конструкторских решений проводились тепловые расчеты различных вариантов схем компоновки жаротрубных котлов с выносными экономайзерами, представленных на рисунке 1, в программном комплексе Boiler Designer. Все расчетные исследования проводились для трех видов топлива – природного газа, сырой нефти и дизеля при избытках воздуха $\alpha=1,15$.

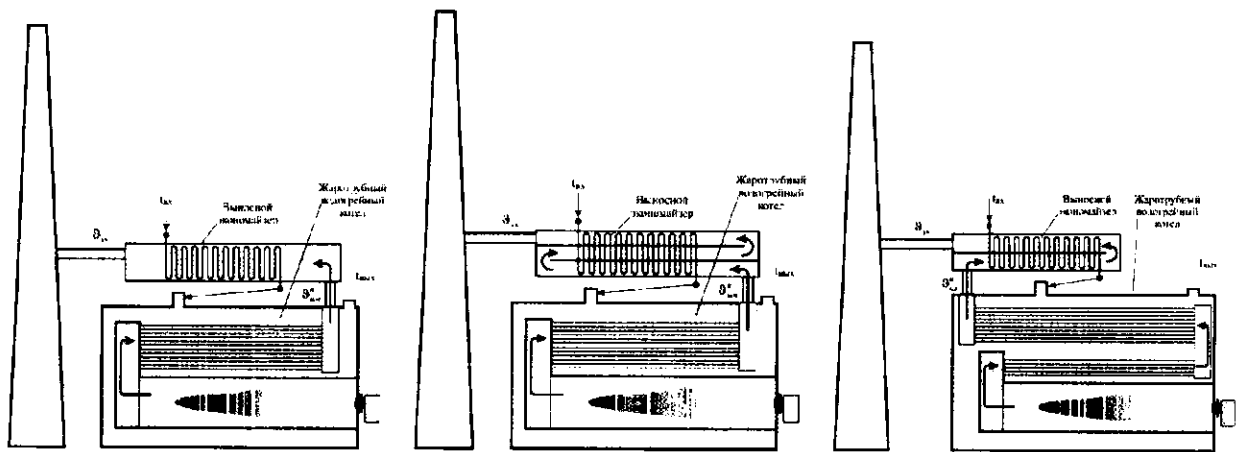


Рисунок 1 – Схемы компоновки жаротрубного котла:

- а) двухходовой котел и одноходовой выносной экономайзер - компоновка «2-1»; б) двухходовой котел и трехходовой выносной экономайзер - компоновка «2-2»; в) трехходовой котел и двухходовой выносной экономайзер - компоновка «3-2»

Для комплексной качественной и количественной оценки эффективности выбора оптимальной схемы жаротрубного котла с выносным экономайзером и разработанных конструкций в данной работе были предложены критерии, учитывающие эксплуатационные параметры рабочих процессов в газовом и

водяном трактах и технико-экономические характеристики для различных конструктивных решений при сжигании рассматриваемых топлив.

Результаты конструктивных тепловых расчетов различных схем компоновки котла с выносным экономайзером приведены в таблице 1.

Схема «2-1» имеет наибольшую глубину по ходу газов теплообменного пучка выносного экономайзера, что исключает возможность его размещения установленных габаритах БМК.

Схема «2-3» имеет наилучшие габаритные размеры, однако за счет высоких скоростей продуктов сгорания ее аэродинамическое сопротивление превышает 2000 Па.

Предпочтительным является вариант схемы «3-2» ввиду меньшего гидравлического сопротивления и приемлемого аэродинамического сопротивления, что позволяет использовать серийно выпускаемые горелки. Масса и габариты теплообменной поверхности незначительно превышают аналогичные характеристики для схемы «2-3» и существенно меньше, чем для схемы «2-1».

Таблица 1 – Результаты расчетов выносного экономайзера

Наименование характеристики	Единица измерений	Варианты компоновки		
		«2-1»	«2-3»	«3-2»
Нагрузка	МВт	3	3	3
Коэффициент избытка воздуха	-	1,15	1,15	1,15
Температура воды на входе	°С	70	70	70
Температура воды на выходе	°С	72,7	72,6	72
Температура газов на входе	°С	350	350	300
Температура газов на выходе	°С	136,4	137,9	136,9
Снимаемое тепло	МВт	0,32	0,32	0,24
Высота теплообменного пучка	м	0,8	0,7	0,7
Ширина теплообменного пучка	м	1	1	1
Глубина теплообменного пучка по ходу газов	м	3,15	1,75	1,95
Диаметр труб	м	0,038	0,038	0,038
Толщина стенки	м	0,003	0,003	0,003
Продольный шаг	м	0,08	0,08	0,08
Поперечный шаг	м	0,05	0,05	0,05
Число параллельно включенных труб	шт.	24	24	24

Продолжение таблицы 1

Количество труб в ряду	-	12	12	12
Количество рядов труб	-	64	36	40
Площадь поверхности	м ²	73,3	36,1	40,1
Масса теплообменной поверхности	кг	1581	778	865
Расход воды	т/ч	103,2	103,2	103,2
Скорость газов	м/с	4,5	17	10,4
Массовая скорость воды	кг/(м ² с)	1485	1485	1485
Гидравлическое сопротивление	кгс/см ²	0,3	0,2	0,2
Аэродинамическое сопротивление	Па	147	2031	711

Далее было проведено сравнение двух возможных вариантов конструкций выносного экономайзера: с внутренним и наружным расположением входного и выходного коллекторов. В результате было принято решение использовать конструкцию выносного экономайзера с внутренним расположением коллекторов, обеспечивающую хорошую газоплотность корпуса выносного экономайзера и дополнительный теплосъем.

Конструкторская проработка теплообменного пучка выносного экономайзера, схема и результаты которой представлены на рисунке 2 и в таблице 2 соответственно, выполнялась в программном комплексе SolidWorks по результатам теплогидравлических расчетов в программном комплексе Boiler Designer.

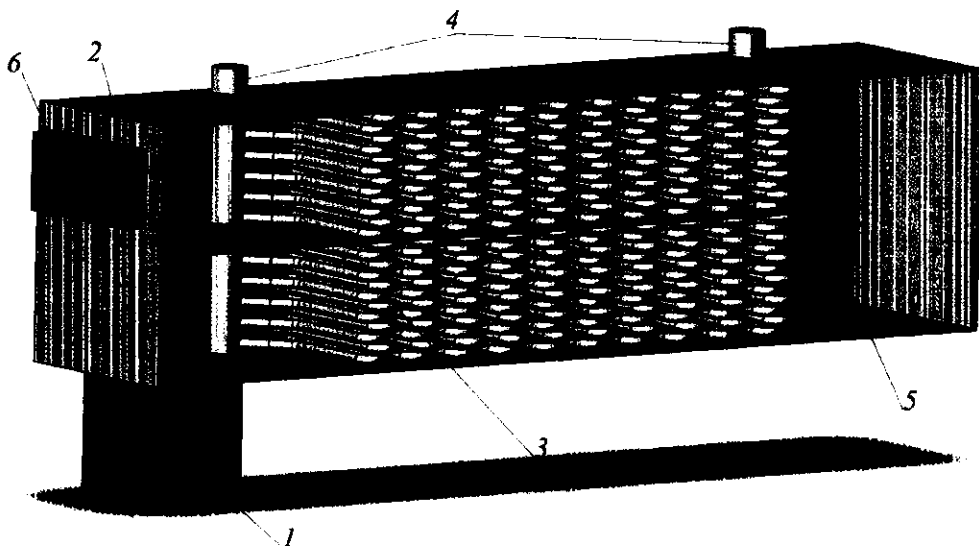


Рисунок 2 – Схема выносного экономайзера: 1 – патрубок входа продуктов сгорания, 2 – корпус, 3 – теплообменная поверхность, 4 – коллектора, 5 – разделительная перегородка, 6 – патрубок выхода продуктов сгорания.

Таблица 2 – Конструктивные параметры выносного экономайзера.

Наименование характеристики	Единица измерений	Значение
Габаритные размеры (ДхШхВ)	м	3,812x0,812x1,605
Масса выносного экономайзера	кг	1831
Высота теплообменного пучка	м	0,7
Ширина теплообменного пучка	м	1
Глубина теплообменного пучка по ходу газов	м	1,95
Диаметр труб	мм	38
Толщина стенки	мм	3
Продольный шаг	мм	80
Поперечный шаг	мм	50
Число параллельно включенных труб	шт.	24
Количество труб в ряду	-	12
Количество рядов труб	-	40
Площадь поверхности	м ²	40,1
Масса теплообменной поверхности с коллекторами	кг	983,5
Диаметр коллектора	мм	133
Толщина стенки коллектора	мм	5,5

В третьей главе приведены результаты расчетных исследований теплообменных элементов жаротрубного котла с выносным экономайзером с целью оптимизации их конструктивных и режимных параметров. С этой целью в работе была предложена, исследована и верифицирована оригинальная компьютерная модель прототипа жаротрубного котла мощностью 3,0 МВт в программе Boiler Designer, учитывающая значительную конвективную составляющую теплообмена в жаровых трубах котлов.

С целью оптимизации конструкторских решений по жаротрубному котлу было рассмотрено 3 варианта дымогарных труб отечественного производства: коррозионностойкие (из сталей 08X18H10T, 08X18H12T) трубы 68×4, и обычные трубы 60×4 и 76×4,5 из стали 20. Результаты сравнения основных характеристик представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Сравнение основных характеристик исследуемых вариантов конструкции жаротрубных котлов

Наименование	Размерность	Дымогарные трубы		
		76×4,5	68×4	60×4
КПД	%	94,9	94,2	94,7
Температура уходящих газов	°С	130	145	133
Температура продуктов сгорания перед выносным экономайзером	°С	275	245	220
Температура продуктов сгорания за жаровой трубой	°С	1090	1095	1090
Число дымогарных труб 2 хода	шт.	44	52	70
Число дымогарных труб 3 хода	шт.	30	36	42
Скорость продуктов сгорания в дымогарных трубах	м/с	23-25	23-26	25
Масса дымогарных труб	кг	1960	1855	2015
Масса труб экономайзера	кг	865	605	605
Аэродинамическое сопротивление поверхностей теплообмена котла с выносным экономайзером	Па	1025	910	990

Таблица 4 – Сравнение основных характеристик разработанных вариантов конструкций выносного экономайзера жаротрубных котлов

Наименование	Размерность	Дымогарные трубы		
		76×4,5	68×4	60×4
Типоразмер труб экономайзера	мм	38×3	38×3	38×3
Число параллельных труб	шт.	24	24	24
Тепловая мощность	кВт	215	150	125
Площадь поверхности теплообмена	м ²	40	28	28
Число рядов труб по ходу газов	шт.	40	28	28
Число петель	шт.	10	7	7
Средняя скорость продуктов сгорания	м/с	9	9,1	8,7
Аэродинамическое сопротивление	Па	680	480	460

Из анализа основных характеристик, представленных в таблицах 3 и 4, видно, что использование дымогарных труб 60×4 позволило уменьшить теплообменную поверхность выносного экономайзера на 30% и соответственно сократить количество петель с 10 до 7. При меньшем количестве петель выносного экономайзера его длина уменьшилась с 1950 мм до 1550 мм. Это позволило уменьшить массу выносного экономайзера на 13%. При этом длина самого котла с дымогарными трубами 60×4 сократилась до 4262 мм, а диаметр цилиндрической обечайки котла уменьшился до 1880 мм, что является наименьшими значениями из всех рассмотренных вариантов. Меньшая температура продуктов сгорания при использовании дымогарных труб 60×4 привела к падению их объёмного расхода и снижению скорости газов на 0,3 м/с. В результате произошло некоторое снижение аэродинамического сопротивления в выносном экономайзере.

Кроме того, как показали теплогидравлические расчеты, обеспечить требуемый КПД котла не менее 94% при снижении температуры наружного воздуха в помещении БМК с плюс 25°С до плюс 10°С удастся только при использовании труб 60×4.

Для оптимизированных конструктивных параметров жаротрубного котла и выносного экономайзера с помощью программного продукта Boiler Designer были выполнены расчетные исследования параметров продуктов сгорания и воды с целью обеспечения устойчивой работы при сжигании основного и резервных топлив в рабочих диапазонах нагрузок: от 40 до 100 % при сжигании сырой нефти и дизеля и от 30 до 100 % – при сжигании природного газа.

Как показали расчеты, КПД котла на всех рабочих режимах превышает минимальный уровень в 94%, что обеспечивается температурой уходящих продуктов сгорания за выносным экономайзером менее 140-150°С. Надёжность работы котла обеспечивается температурой продуктов сгорания за жаровой трубой менее 1100°С при сжигании жидкого топлива. Для природного газа она также не превышает допустимую величину в 1200°С.

Суммарное сопротивление элементов по тракту продуктов сгорания составило 1,1 бар. Это превышает аналогичную величину аэродинамического сопротивления существующих жаротрубных котлов с КПД 90-92%, в том числе прототипа, на 10-20% из-за наличия выносного экономайзера и перепускного газохода. В водяном тракте основное сопротивление рабочей среды приходится на выносной экономайзер. При скорости воды в трубах равной 1,5 м/с оно составило 0,35 бар.

Результаты расчетов предложенной конструкции котла с выносным экономайзером на три вида топлива в рабочих диапазонах нагрузок показали, что все основные технико-экономические параметры предложенного котла удовлетворяют техническим требованиям.

В четвертой главе с целью дальнейшей оптимизации конструкции выносного экономайзера были проведены расчетные исследования аэродинамики его газоходов и влияния конструкции на его аэродинамическое сопротивление. Исследование аэродинамики газохода проводилось путем

моделирования потока газов в программной среде ANSYS CFX. Объектом исследований являлся газоход выносного экономайзера разрабатываемого жаротрубного котла. Подготовка трёхмерной геометрической модели осуществлялась в программе SolidWorks. Общий вид модели объекта исследований и его расчетной сетки показан на рисунке 3.

Характеристики среды на входе в модель задавались по результатам теплогидравлического расчёта. Также с учётом результатов выполненного ранее теплогидравлического расчёта определялись локальные значения удельного теплосъёма (кВт/м^3). Тепловая неравномерность, создаваемая изменением температуры воды в поверхностях экономайзера, не учитывалась ввиду ее ничтожности (нагрев воды в выносном экономайзере составляет 2-3°C).

Всего в ходе численных экспериментов было исследовано свыше 20 вариантов газового тракта выносного экономайзера, отличающихся конструкцией перепускного газохода и входной части экономайзера, с целью исключения застойных зон, вихрей и минимизации аэродинамического сопротивления, из которых на рисунке 4 представлены 8 основных. Моделирования различных вариантов конструкции газохода экономайзера проводилось для нагрузки 100%. Исследование работы газохода при пониженной нагрузке проводилось только для выбранного впоследствии оптимального варианта конструкции газохода экономайзера.

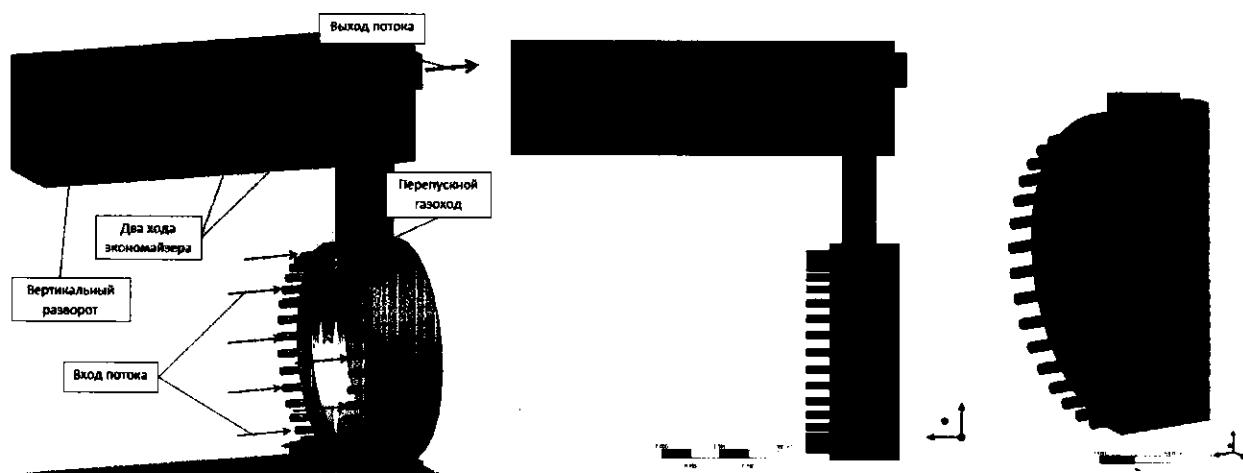


Рисунок 3 - Общий вид трёхмерной геометрической модели выносного экономайзера и его расчетной сетки

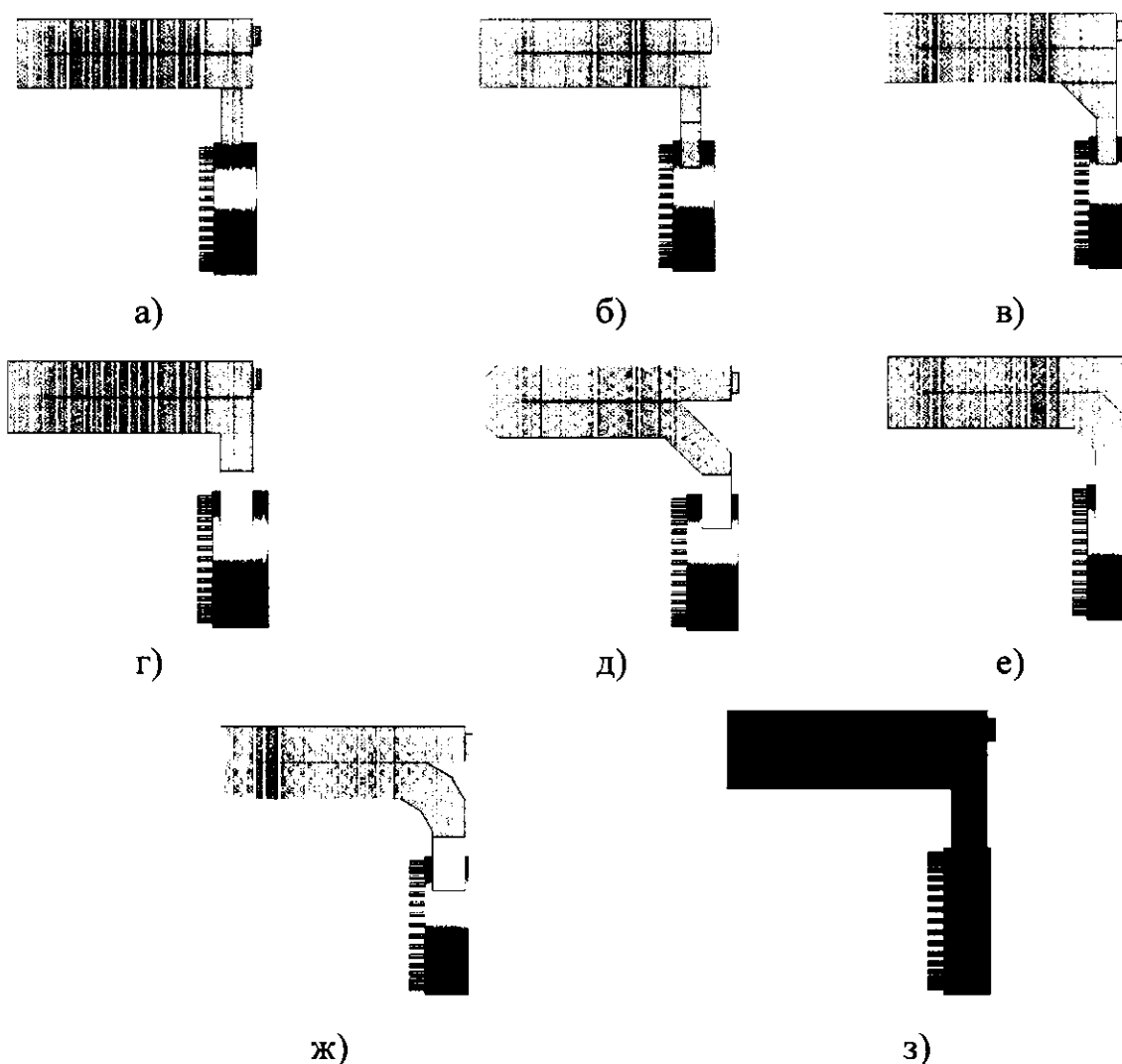


Рисунок 4 – Варианты конструкции газохода:
 а) №1; б) №2; в) №3; г) №4; д) №5; е) №6; ж) №7; з) №8

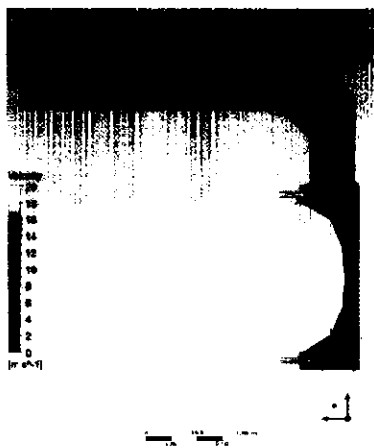
Основным критерием, который был использован для выбора оптимального решения, являлась минимизация аэродинамического сопротивления, которое определялось, как разница между среднеинтегральными значениями полных давлений на входе и на выходе из расчётной области. Также оценивалась стационарность исследуемой картины течения и минимизация различных вихревых и застойных зон путём анализа полей скоростей, давлений, температур и т.д. Данные по аэродинамическому сопротивлению в исследованных вариантах представлены в таблице 5.

Наименьший уровень аэродинамического сопротивления наблюдался для вариантов №6 и №7 (рисунки 4.14, б, в). Однако ввиду того, что вариант №7 конструктивно сложнее, было принято решение использовать в качестве оптимальной конструкцию варианта №6 исполнения газохода экономайзера. По сравнению с базовым вариантом №1 это позволило добиться снижения аэродинамического сопротивления без учёта поверхностей нагрева на 25,3%. Результаты численных экспериментов для варианта №6 при нагрузках 100% и 40% от номинальной приведены на рисунке 5.

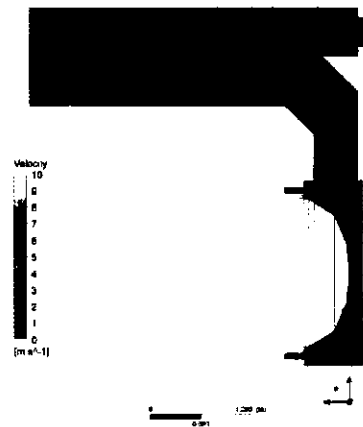
Таблица 5 – Данные по аэродинамическому сопротивлению в исследованных вариантах

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Аэродинамическое сопротивление* с учетом сопротивления поверхностей нагрева экономайзера, Па	690	683	663	646	642	638	637	647
Аэродинамическое сопротивление* без учёта сопротивления поверхностей нагрева экономайзера, Па	205	198	178	161	157	153	152	162
Снижение аэродинамического сопротивления* без учёта поверхностей нагрева экономайзера по сравнению с базовым вариантом, %	—	3,4	13,2	21,5	23,4	25,4	25,9	21,0

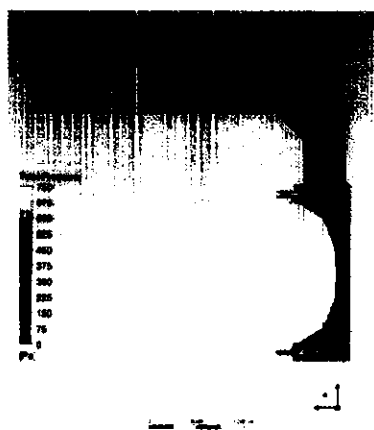
* Аэродинамическое сопротивление газового тракта на участке от выхода из второго хода дымогарных труб до выхода из экономайзера.



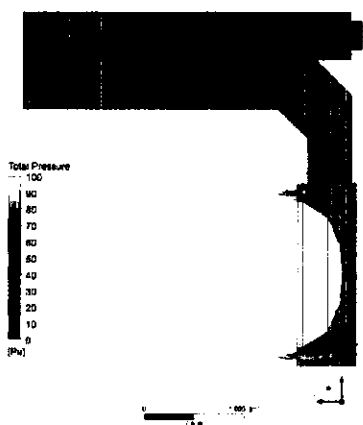
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Распределение модуля скорости (м/с) (а, б) и полного давления (Па) (в, г) с наложенными векторами по скорости для варианта №6 при нагрузке 100% (а, б) и 40% (в, г) от номинальной

Проведенные расчетные исследования влияния различных вариантов конструкции газового тракта выносного экономайзера на его аэродинамику и эффективность омывания поверхностей нагрева позволили оптимизировать конструкцию подводящего газохода и газового тракта выносного экономайзера, минимизировав аэродинамическое сопротивление и предотвратив образования вихревых и застойных зон.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований опытно-промышленных образцов предложенного энергоэффективного котла с выносным экономайзером номинальной теплопроизводительностью 3,0 МВт, изготовленных на ООО «Ижевский котельный завод» по результатам проведенных в данной работе расчетных исследований (рисунок 6).

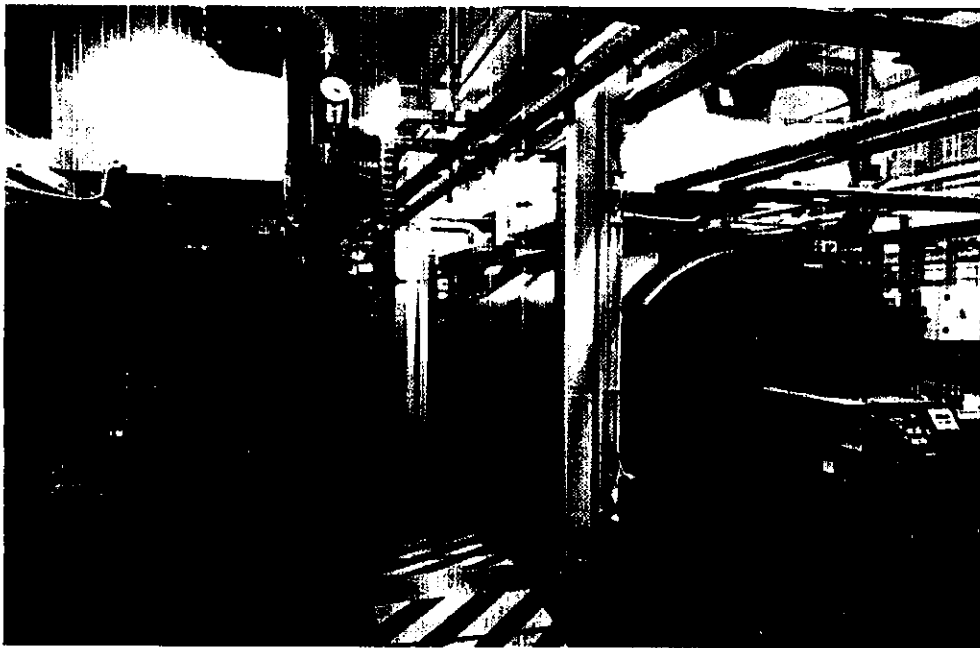


Рисунок 6 – Опытные образцы энергоэффективного котла с выносным экономайзером

Экспериментальные исследования котлов были проведены в рамках приемочных испытаний опытных образцов в составе блочно-модульной котельной базы производственного обслуживания Пермского РНУ АО «Транснефть-Прикамье» во время отопительного периода.

Испытания осуществлялись включением котла под нагрузкой со снятием теплотехнических показателей и определением КПД на нагрузках 40%, 60%, 80% и 100% от номинальной. Режимы нагрузок корректировались с учетом температуры наружного воздуха во время проведения испытаний. Полученные в ходе испытаний экспериментальные зависимости КПД, температур продуктов сгорания за котлом и за экономайзером, а также концентрации в продуктах сгорания O_2 , CO и NO_x представлены на рисунке 7.

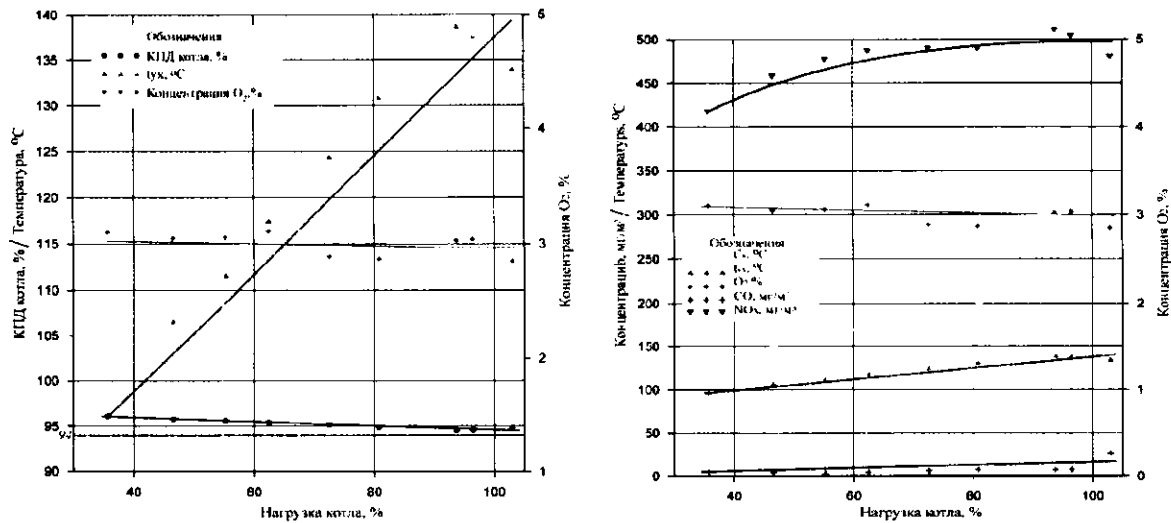


Рисунок 7 – Зависимость концентраций O₂, CO и NO_x, температуры дымовых газов за котлом и экономайзером и КПД от нагрузки котла

По результатам исследований оба котла продемонстрировали КПД выше 94% во всем диапазоне нагрузок, которые составляли 36-103% для котла №1 и 36-105% для котла №2 от номинальной теплопроизводительности. Со снижением нагрузки котлов их КПД увеличивается и на минимальных нагрузках превышает 96%. Минимальные значения КПД при приемочных испытаниях котлов №1 и №2 составило 94,5% и 95,2% соответственно, а среднее значение КПД - 95,2% и 95,7% соответственно. Повышенный КПД котлов позволяет сократить потребление энергоресурсов на 5–10 % по сравнению показателями расхода топлива при использовании существующего энергетического оборудования.

Концентрация CO в продуктах сгорания во всем диапазоне нагрузок не превышала 20-25 мг/м³ на котле №1 и 70-80 мг/м³ на котле, что значительно ниже установленных ГОСТ 30735-2001 предельных значений, равных 160 мг/м³. Для снижения выбросов оксидов азота при серийном производстве котлов их следует комплектовать малоэмиссионными горелками. Визуальный осмотр дымогарных труб и труб экономайзера обоих котлов после их испытаний показал, что на данных поверхностях практически отсутствуют загрязнения.

В ходе приемочных эксплуатационных испытаний было подтверждено соответствие разработанных опытных изделий и всех контролируемых технических параметров требованиям технического задания. Технический уровень изделий соответствует действующим нормативам и превосходит существующие зарубежные образцы. На конструкции котла и выносного экономайзера получены патенты на полезные модели № 177320 от 15.02.2018, №192202 от 06.09.2019 патент на промышленный образец №116602 от 26.09.2019, патент на изобретение № 2736315 от 13.11.2020. Котел с выносным экономайзером сертифицирован для работы на опасных производственных объектах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена и обоснована схема трехходового жаротрубного водогрейного котла с двухходовым выносным экономайзером, позволяющая исключить низкотемпературную коррозию котельных поверхностей при сжигании сернистых топлив и обеспечивающая существенное повышение КПД.
2. Для объективного сравнения результатов расчетных исследований предложены критерии, которые позволяют качественно и количественно оценить эффективность протекания рабочих процессов в газовом и водяном трактах котла с выносным экономайзером для различных конструктивных решений при сжигании основного и резервных топлив.
3. Проведена разработка, отладка и верификация адаптированной компьютерной модели жаротрубного водогрейного котла на базе программного продукта Boiler Designer, учитывающая значительную (до 30%) долю конвективного теплообмена в жаровых трубах.
4. С помощью доработанной для жаротрубных котлов компьютерной модели на базе программного продукта Boiler Designer выполнены инвариантные теплогидравлические расчеты для различных альтернативных конструкций при сжигании сырой нефти и резервных топлив, позволившие определить оптимальные конструктивные и режимные характеристики котла и выносного экономайзера с целью удовлетворения техническим требованиям.
5. Проведены расчетные исследования влияния конструкции газового тракта выносного экономайзера на его аэродинамику и эффективность омывания поверхностей нагрева в программном комплексе ANSYS CFX с целью оптимизировать конструкцию подводящего газохода и газового тракта выносного экономайзера и минимизировать аэродинамическое сопротивление.
6. Проведенные испытания двух опытных образцов предложенных жаротрубных котлов с выносным экономайзером типа КВа-3,0МЭ подтвердили их высокие технико-экономические характеристики и КПД более 94 % на всех режимах сжигания сырой нефти в диапазоне нагрузок 40-100% от номинальной теплопроизводительности. Средний КПД котлов в рабочем диапазоне превысил 95%, что позволило сократить потребление топлива на 5–10 % по сравнению использованием существующего энергетического оборудования.
7. На предложенный жаротрубный котел разработана конструкторская документация, конструкции котла и выносного экономайзера имеют патентную защиту; подготовлено серийное производство оборудования на заводах системы «Транснефть».
8. Разработанные жаротрубные котлы с выносным экономайзером могут быть установлены в составе блочно-модульных котельных на объектах системы «Транснефть», а также на объектах жилищно-коммунального хозяйства и промышленных предприятий в районах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, где испытывается дефицит традиционных энергетических топлив.

Основные публикации по теме диссертации

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

1. Revel-Muroz P. A., Proskurin Y. V., Kopysov A. F., Grisha B. G., Ilyina M. P., Roslyakov P. V., Ionkin I. L. Development of energy-efficient hot-water boiler for block-modular boiler house of Transneft. *Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov = Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2018; 8(2):180–187. DOI: 10.28999/2541-9595-2018-8-2-180-187.

2. Revel-Muroz P. A., Roslyakov P. V., Proskurin Y. V., Ionkin I.L., Kopysov A. F., Grisha B. G. AUTONOMOUS SYSTEM OF THERMAL POWER EQUIPMENT OF THE NEXT GENERATION// *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2020 10(4):394–404. ISSN Print 2221-2701 / eISSN 2541-9595. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-4-394-404.

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

3. Разработка и создание отечественного высокоэффективного энергетического оборудования для сжигания сырой нефти/Росляков П.В., Гриша Б.Г., Ионкин И.Л., Зайченко М.Н.//*Вестник МЭИ*, 2018, №6. С. 33-42. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-33-42.

4. Исследование возможности повышения эффективности сжигания жидких топлив за счет присадок углеводородов / Росляков П.В., Гриша Б.Г., Зайченко М.Н., Хохлов Д.А. // *Промышленная энергетика*. 2018. № 7

Патенты:

5. Многоходовой жаротрубный водогрейный котел / Ревель-Муроз П.А., Копысов А.Ф., Проскурин Ю.В., Лисин Ю.В., Казанцев М.Н., Гриша Б.Г., Воложенин А.С., Росляков П.В. // Патент РФ на полезную модель RU 177320 U1 Дата гос. регистрации в Государственном реестре полезных моделей РФ 15.02.2018.

6. Котел водогрейный с выносным экономайзером / Ревель-Муроз П.А., Копысов А.Ф., Проскурин Ю.В., Фридлянд Я.М., Воронов В.И., Гриша Б.Г., Садовников Е.С. // Патент на промышленный образец № 116602. Дата гос. регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 26.09.2019.

7. Способ повышения надежности водогрейного котла с выносным экономайзером / Ревель-Муроз П.А., Копысов А.Ф., Проскурин Ю.В., Гриша Б.Г., Фазлыев М.Н. // Патент на изобретение № 2736315. Дата гос. регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 13.11.2020.

Статьи в изданиях, включенных в РИНЦ:

8. Разработка энергоэффективного водогрейного котла для блочно-модульной котельной ПАО «Транснефть» / П.А. Ревель-Муроз, А.Ф. Копысов, Ю.В. Проскурин, Б.Г. Гриша, М.Н. Ильина, П.В. Росляков, И.Л. Ионкин // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2018. Т. 8. №2.

9. Автономный комплекс теплоэнергетического оборудования нового поколения/ Ревель-Муроз П.А., Росляков П.В., Проскурин Ю.В., Ионкин И.Л., Копысов А.Ф., Гриша Б.Г.// Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. №4.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских конференций:

10. Optimization of Remote Economizer Flue Duct Using the ANSYS Software/P.V. Roslyakov, D. A. Khokhlov, L. E. Egorova, M. N. Zaichenko, B. G. Grisha // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2018. DOI: 10.1109/INFORINO.2018.8581774.

11. Development of a Computer Model of a Fire-Tube Hot Water Boiler, its Verification and Use in the Design Process/Roslyakov P.V., K. A. Pleshanov, V. M. Supranov, M. N. Zaichenko, I. L. Lonkin, K. V. Sterkhov, B.G. Grisha // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2018. DOI: 10.1109/INFORINO.2018.8581782.

12. Росляков, П.В. Автономные энергоэффективные комплексы на сырой нефти для работы в арктических условиях/Росляков П.В., Проскурин Ю.В., Гриша Б.Г., Ионкин И.Л.// Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики». 2021, г. Якутск — Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2021. – С.40-42.