На правах рукописи



МАЛКОВ Евгений Сергеевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И СХЕМЫ ПГУ-КЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ КАМЕРЫ СЖИГАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОФИКАЦИИ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2014

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент **Шелыгин Борис Леонидович**

Официальные оппоненты:
Зройчиков Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», профессор кафедры «Тепловые электрические станции»

Мельников Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», доцент кафедры «Теплоснабжение, вентиляция и гидравлика»

Ведущая организация:
ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится 30 января 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Malkov_0.pdf. Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент  Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ[1]

Актуальность работы. Одним из направлений развития энергетики является широкое внедрение комбинированных парогазовых установок (ПГУ), в которых используется тепло выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ). В ряде случаев в котлах-утилизаторах ПГУ для увеличения температуры газового потока используются схемы со сжиганием топлива в выхлопных газах ГТУ. Камеры сжигания дополнительного топлива в зависимости от назначения могут размещаться в различных частях газового тракта котла-утилизатора. В настоящее время отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по выбору места установки и режимов работы камеры сжигания дополнительного топлива, обеспечивающие достижение высоких технико-экономических показателей всего энергоблока.

Целью диссертационной работы является поиск рационального места расположения камеры сжигания дополнительного топлива в газоходе котла-утилизатора, определение режимов её работы и конструкции газового подогревателя сетевой воды применительно к технологической схеме ПГУ-КЭС.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- анализ показателей эффективности сгорания топлива и параметров работы камеры сжигания дополнительного топлива в условиях применения на ПГУ-КЭС для теплофикации;
- поиск рационального места расположения камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды в газоходе котла-утилизатора энергоблока ПГУ-325;
- выбор конструкции газового подогревателя сетевой воды применительно к котлу-утилизатору марки «П-88», обеспечивающей наилучшие технико-экономические показатели энергоблока;
- анализ показателей эффективности работы энергоблока ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива и газовым подогревателем сетевой воды для теплофикации;
- анализ показателей эффективности работы котла-утилизатора в режимах с подачей воздуха в камеру сжигания дополнительного топлива.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: ***в части формулы специальности*** – «проблемы совершенствования действующих и обоснования новых технологий производства … тепла, систем … сжигания топлива»; ***в части области исследования*** –пункту 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах …»; пункту 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства … тепла, использования топлива»; пункту 4: «Разработка конструкций теплового и

[1] Постановка задач исследования и разработка имитационных моделей оборудования выполнялась под руководством Заслуженного деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, проф. А.В. Мошкарина

вспомогательного оборудования…»; пункту 6: «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. В программном комплексе вычислительной аэродинамики Flow Vision разработана имитационная модель камеры сжигания дополнительного топлива с горением природного газа в следующих диапазонах параметров входящего потока выхлопных газов газовой турбины: температуры от 90 до 150 °С и объемного содержания молекулярного кислорода от 12 до 17 %.

2. Получены новые расчетные данные, характеризующие эффективность и устойчивость процесса горения в камере сжигания дополнительного топлива в потоке выхлопных газов газовой турбины в диапазонах температур от 90 до 150 °С и объемного содержания молекулярного кислорода от 12 до 17 %.

3. Определены режимные параметры, обеспечивающие эффективное применение камеры сжигания дополнительного топлива на ПГУ-КЭС для теплофикации.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Разработана номограмма для определения величины потери теплоты с химическим недожогом в камере сжигания дополнительного топлива в диапазонах температур от 90 до 150 °С и объемного содержания молекулярного кислорода от 12 до 17 %.

2. В программном комплексе Boiler Designer разработана модель дубль-блока ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива и газовым подогревателем сетевой воды, позволяющая определить показатели эффективности работы оборудования энергоблока.

3. Получены расчетные зависимости для оценки условий и показателей эффективности работы камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды в котле-утилизаторе предложенного компоновочного решения от параметров потока газов и расхода топлива.

4. Разработано компоновочное решение, защищенное патентом на полезную модель, обеспечивающее эффективное применение камеры сжигания дополнительного топлива на ПГУ-КЭС для теплофикации.

Достоверность полученных результатов подтверждена использованием сертифицированных коммерческих программных комплексов вычислительной аэродинамики Flow Vision и теплоэнергетического оборудования Boiler Designer, верифицированных на тестовых задачах и по результатам натурных испытаний оборудования энергоблока ПГУ-325 филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация»; применением апробированных методов оценки тепловой экономичности ТЭС; согласованностью отдельных результатов работы с опубликованными данными других авторов.

Автор защищает:

- результаты моделирования процесса горения топлива в камере сжигания дополнительного топлива с диффузионно-стабилизаторными горелками;

- результаты расчетных исследований условий работы камеры сжигания дополнительного топлива на ПГУ-КЭС для теплофикации;

- результаты выбора рациональной конструкции газового подогревателя сетевой воды применительно к котлу-утилизатору марки «П-88»;

- результаты анализа показателей работы дубль-блока ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива для теплофикации;

- результаты расчетных исследований по изменению показателей эффективности работы энергоблока в режимах с подачей воздуха в камеру сжигания дополнительного топлива;

- новое компоновочное решение газового тракта котла-утилизатора для увеличения эффективности работы ПГУ-КЭС за счет установки камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды за газовым подогревателем конденсата.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при разработке стратегии развития филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация» с энергоблоком ПГУ-325 с годовой экономией условного топлива в количестве 2 250 тонн, внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета по кафедре «Тепловые электрические станции» в виде электронного учебного пособия и расчетной компьютерной программы. Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения.

Личный вклад автора состоит в постановке задач и цели исследования, анализе компоновочного решения для повышения эффективности работы ПГУ-КЭС, разработке имитационных моделей камеры сжигания дополнительного топлива и энергоблока ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива, проведении анализа условий работы камеры сжигания дополнительного топлива и показателей эффективности работы энергоблока с новым компоновочным решением.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на десяти международных конференциях: VII Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2012» (г. Иваново, 2012 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Энергосбережение в промышленности» (г. Чебоксары, 2012 г.); Специализированной научно-практической конференции молодых специалистов, посвященной 125-летию со дня рождения Л.К. Рамзина «Современные технологии в энергетике - основа повышения надежности, эффективности и безопасности оборудования ТЭС» (г. Москва, 2012 г.); Международной молодежной научной школе «Энергосбережение - теория и практика» (г. Томск, 2012 г.); XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2013 г.); VIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2013 г.); Международной научно-

технической конференции «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (г. Челябинск, 2013 г.); VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013» (г. Иваново, 2013 г.); XVII Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2013 г.); XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2014 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ, в том числе девять статей в ведущих рецензируемых журналах (по списку ВАК), одна статья в сборнике научных трудов; получен патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 111 наименований. Работа изложена на 142 стр. машинописного текста, включает 64 рисунка и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована принадлежность диссертации заявленной научной специальности, достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору применяемых в энергетике ПГУ для теплофикации. Основные теоретические работы по исследованию схемных решений ПГУ, совершенствованию режимов работы и конструкций оборудования принадлежат Андрющенко А.И., Арсеньеву Л.В., Цаневу С.В., Бурову В.Д., Степанову И.Р. и др.

Ввиду особенностей конструкции ГТУ её выхлопные газы содержат большое количество кислорода и имеют достаточно высокую температуру. Поэтому выхлопные газы ГТУ можно использовать в качестве малоактивного окислителя процесса горения. Сжигание топлива в потоке выхлопных газов ГТУ позволяет повысить их температуру, мощность энергоблока, стабилизировать параметры генерируемого в котле-утилизаторе пара, а также увеличить количество вырабатываемой тепловой энергии.

Выработка тепловой энергии для теплофикации на ТЭЦ производится паром отборов турбин, что в настоящее время является наиболее экономичным способом получения теплоты. На ПГУ-КЭС камеры сжигания дополнительного топлива используются для увеличения электрической мощности, а тепловая энергия для потребителей вырабатывается преимущественно в водогрейных котлах. На данных энергоблоках выработка тепловой энергии

при использовании потенциала выхлопных газов ГТУ для сжигания топлива в камере сжигания дополнительного топлива возможна только с применением газового подогревателя сетевой воды, расположенного в газоходе котла-утилизатора.

В главе показано, что вопросы использования выхлопных газов ГТУ в качестве малоактивного окислителя процесса горения на ПГУ-КЭС недостаточно проработаны при необходимости отпуска тепловой энергии для теплофикации.

На основании поставленной цели и проведенного анализа научных работ сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена расчетному анализу влияния параметров работы ГТУ на условия работы камеры сжигания дополнительного топлива, расположенной за газовым подогревателем конденсата двухконтурного котла-утилизатора (рис. 1), а также на потенциал использования выхлопных газов в качестве окислителя топлива.

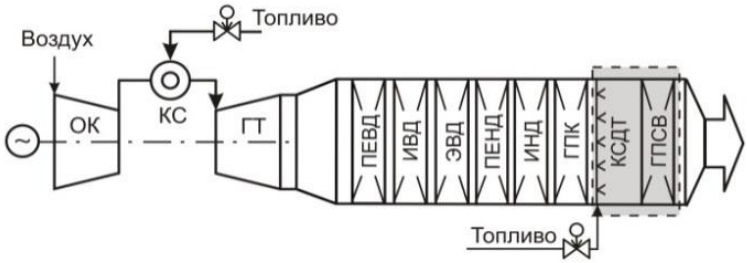


Рис. 1. Принципиальная схема предлагаемой компоновки котла-утилизатора с камерой сжигания дополнительного топлива (КСДТ) и газовым подогревателем сетевой воды (ГПСВ): ОК – осевой компрессор, КС – камера сгорания, ГТ – газовая турбина, ПЕВД - пароперегреватель высокого давления, ИВД – испаритель высокого давления, ЭВД – экономайзер высокого давления, ПЕНД – пароперегреватель низкого давления, ИНД - испаритель низкого давления, ГПК – газовый подогреватель конденсата

Компоновка элементов газового тракта котла-утилизатора, представленная на рис. 1, предполагает подачу природного газа в поток выхлопных газов с температурой от 114 до 140 °С и объемным содержанием кислорода от 14 до 18 %, что усложняет воспламенение и выгорание топлива.

Для оценки устойчивости воспламенения и экономичности сжигания дополнительного топлива разработана трехмерная модель камеры в программном комплексе Flow Vision, в котором используется конечно-объемный метод расчета гидродинамических уравнений. Данная модель представляет собой полноразмерный макет участка газохода котла-утилизатора с камерой сжигания дополнительного топлива, которая состоит из ряда диффузионно-стабилизаторных горелочных устройств, расположенных вертикально в одной плоскости. Математическая модель физического процесса массопереноса «Горение» предполагает брутто-реакцию с двумя конечными продуктами.

При моделировании программный комплекс решает уравнения Навье-Стокса, уравнение энергии, записанное через полную энтальпию, и уравнения турбулентных переменных. В качестве математической основы расчетов выбрана модель горения Аррениуса-Магнуссена, скорость реакции которой определяется кинетикой процесса и скоростью турбулентного смешения горючего и окислителя. Для расчетов турбулентности потоков использована квадратичная k-ε модель.

Параметры потока газов во входном сечении модели (рис. 2) соответствуют параметрам газового потока за газовым подогревателем конденсата котла-утилизатора энергоблока ПГУ-325. Исследование проведено при параметрах газового потока в диапазонах температур от 90 до 150 °С и объемного содержания кислорода от 12 до 19 %.

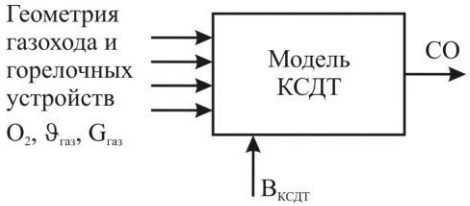


Рис. 2. Условная схема модели камеры сжигания дополнительного топлива (КСДТ)

На основании результатов расчетов разработанной модели камеры сжигания дополнительного топлива сделан вывод, что при температуре газового потока от 90 до 150 °С устойчивое воспламенение топлива осуществляется при объемном содержании кислорода выше 12-13 % в зависимости от температуры газов и расхода топлива (рис. 3), что совпадает с экспериментальными данными ОАО «ВТИ». При объемном содержании кислорода менее 14-15 % наблюдается резкое увеличение содержания оксида углерода в выходном сечении модели камеры сжигания дополнительного топлива.

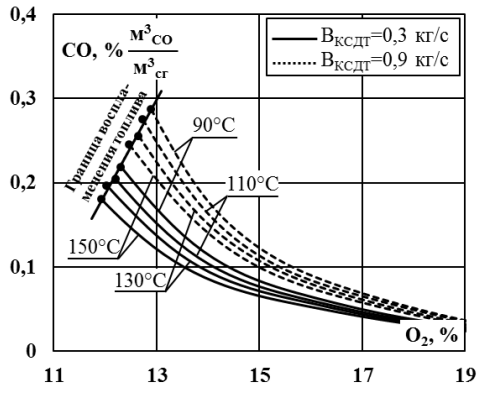


Рис. 3. Изменение объемного содержания оксида углерода в зависимости от параметров потока газов ГТУ и расхода топлива

В диапазоне объемного содержания кислорода $O_2^{КСДТ(вх)}$ от 12 до 15 % наблюдается влияние температуры входящего потока газов $\vartheta_{КСДТ}^{вх}$ на содержание оксида углерода в выходном сечении модели. При объемном содержании кислорода выше 17 % влияние температуры газов незначительно.

По результатам обработки полученных данных моделирования разработана номограмма для определения величины потери теплоты с химической

неполнотой сгорания топлива q_3 в зависимости от количества сжигаемого топлива и параметров потока газов ГТУ: его температуры и объемного содержания кислорода на входе в камеру сжигания дополнительного топлива (рис. 4). В правой части выделена область параметров работы газовой турбины ГТЭ-110 в рабочем диапазоне нагрузок и температур наружного воздуха $t_{нв}$ от -30 до +30 °С, в левой части – диапазон расходов топлива в камеру сжигания дополнительного топлива для выработки тепловой мощности 34,2 МВт. В данных условиях работы величина q_3 изменяется в диапазоне от 0,5 до 1,04 %.

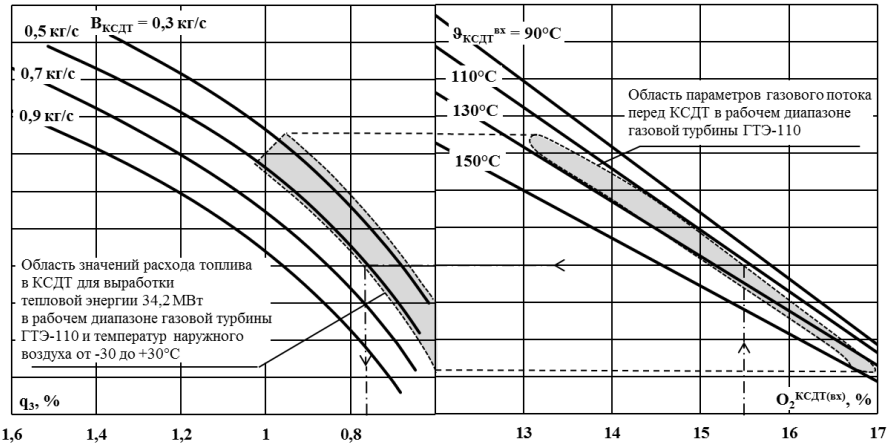


Рис. 4. Изменение величины потери теплоты с химической неполнотой сгорания топлива q_3 в зависимости от параметров потока газов ГТУ и расхода топлива

Следует отметить, что полученные результаты согласуются с оценкой величины q_3 с использованием Нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов на основании сравнения с условиями сжигания доменного газа при пониженном содержании кислорода.

С использованием уравнений материального и теплового балансов потоков получены расчетные формулы для оценки условий и параметров работы камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды по следующим показателям:

- объемное содержание кислорода в газах за камерой сжигания дополнительного топлива;
- максимальная величина относительного расхода топлива в камеру сжигания дополнительного топлива;
- коэффициент избытка воздуха за камерой сжигания дополнительного топлива;
- температура газов за камерой сжигания дополнительного топлива;
- коэффициент полезного действия газового подогревателя сетевой воды;

- снижение потери теплоты с уходящими газами котла-утилизатора.

Расчетным путем определены характеристики экономичности котла-утилизатора в зависимости от режима работы газовой турбины и количества сжигаемого дополнительного топлива.

При условии достижения объемной концентрации кислорода 12,5 % относительный расход топлива в камеру сжигания дополнительного топлива в зависимости от коэффициента избытка воздуха может достигать значений от 0,1 до 1,3 (по отношению к расходу топлива в камеру сгорания газовой турбины). В режиме работы с максимально возможным расходом топлива в камеру сжигания могут быть достигнуты температуры газового потока от 230 до 690 °С, при этом коэффициент избытка воздуха уменьшается до значения 2,62, что позволит уменьшить потери теплоты с уходящими газами котла-утилизатора на 2,2 - 10,7 %.

Третья глава посвящена определению рационального расположения камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды в газоходе котла-утилизатора, обоснованию технико-экономической эффективности применения предложенного компоновочного решения, и определению конструктивных параметров газового подогревателя сетевой воды.

Для решения поставленной задачи разработана расчетная модель энергоблока ПГУ-325 в программном комплексе Boiler Designer, который основан на объектно-ориентированном принципе построения технологических схем и осуществляет расчеты материальных и тепловых балансов, гидравлические и аэродинамические расчеты элементов. Разработанная модель обеспечивает определение показателей эффективности работы энергоблока в различных режимах его эксплуатации. Показатели работы модели соответствуют фактическим характеристикам ПГУ-325. Верификация модели выполнена с использованием результатов натурных испытаний оборудования в условиях филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация».

Для выбора оптимального расположения камеры сжигания дополнительного топлива и низкотемпературных поверхностей нагрева в газоходе котла-утилизатора при условиях сопоставимости (температура уходящих газов не ниже 96 °С, скорости рабочей среды в диапазоне от 0,5 до 1,5 м/с, температура сетевой воды 150 °С) рассмотрены три варианта компоновок:

1) камера сжигания дополнительного топлива и газовый подогреватель сетевой воды установлены за газовым подогревателем конденсата (рис. 5а);

2) камера сжигания дополнительного топлива расположена перед газовым подогревателем конденсата и газовым подогреватель сетевой воды (рис. 5б);

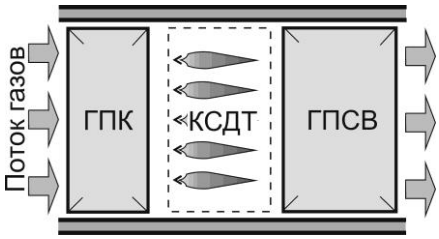
3) газовый подогреватель конденсата установлен за камерой сжигания дополнительного топлива и газовым подогревателем сетевой воды (рис. 5в).

Исследование проведено для расчетного режима при стандартных условиях: $t_{нв}$ = +15 °С; $p_{атм}$ = 0,1013 МПа; $\varphi_{отн}$ = 60 %.

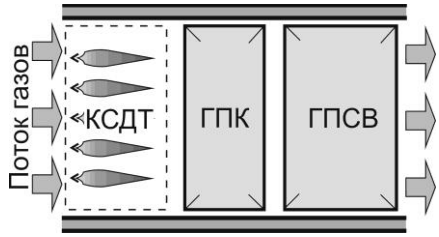
Независимо от компоновки коэффициент использования топлива $\eta_{и.т}$ увеличивается в номинальном режиме работы ГТУ (рис. 6) с 54,3 % до 58,5 - 59,0 % (на 4,2 - 4,7 %), на низких нагрузках – с 43,3 % до 51,6 - 55,8 % (на 8,3 - 12,5 %). Наибольшая величина $\eta_{и.т}$ соответствует варианту 1.

В вариантах 2 и 3 газовый подогреватель конденсата является зависимым элементом от нагрузки камеры сжигания дополнительного топлива, поэтому изменение расхода топлива $B_{КСДТ}$ оказывает влияние на работу пароводяного тракта. Это является основным недостатком данных компоновок. Наименьшее влияние на работу паротурбинной части имеет вариант 1. Наибольшее различие тепловой мощности газового подогревателя конденсата для данной компоновки составляет 6,1 МВт при низких нагрузках ГТУ, причем различия проявляются при нагрузках менее 80 %. Это вызвано перераспределением теплоперепадов в поверхностях нагрева и снижением скорости газов из-за увеличения аэродинамического сопротивления газового тракта котла-утилизатора.

а) вариант № 1



б) вариант № 2



в) вариант № 3

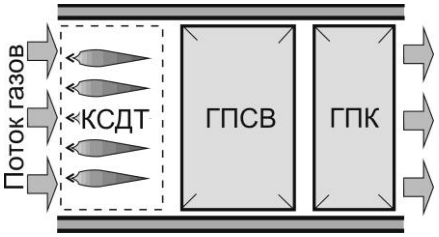


Рис. 5. Варианты расположения камеры сжигания дополнительного топлива, газового подогревателя сетевой воды и газового подогревателя конденсата

На основании анализа полученных результатов наиболее рациональной компоновкой газового тракта котла-утилизатора признан вариант 1.

В работе проведено технико-экономическое сравнение эффективности двух вариантов увеличения тепловой мощности ПГУ-КЭС:

- модернизации котла-утилизатора за счет установки в газоход камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды;
- установки водогрейного котла аналогичной мощности.

Наиболее близким водогрейным котлом по тепловой мощности является КВГМ-35-150. По результатам сравнительного анализа капитальных затрат

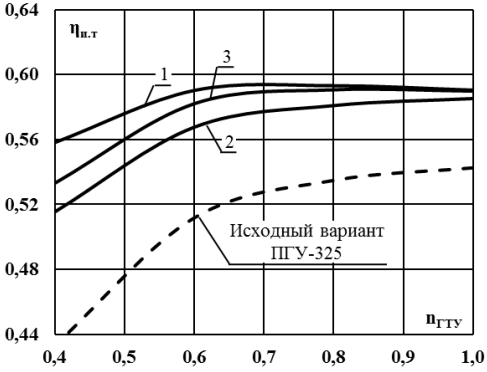


Рис. 6. Изменение коэффициента использования топлива $\eta_{и.т}$ в зависимости от варианта компоновки (1-3) и относительной мощности ГТУ $n_{ГТУ}$

двух вариантов (табл. 1) сделан вывод, что стоимость модернизации котла-утилизатора составляет около 60 % от стоимости водогрейного котла.

Одним из главных критериев оценки эффективности работы энергоустановки является экономия топлива. Для анализируемых вариантов относительная экономия топлива определена следующим образом, %:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{B_{ВК} - B_{КСДТ}}{B_{ГТУ} + B_{ВК}} 100\%, \quad (1)$$

где $B_{КСДТ}$ и $B_{ВК}$ - суммарные расходы топлива на выработку тепловой энергии при установке камеры сжигания дополнительного топлива с газовым подогревателем сетевой воды и водогрейного котла, соответственно, $B_{ГТУ}$ - расход топлива в камеру сгорания ГТУ.

Таблица 1. **Капитальные затраты анализируемых вариантов в ценах 2012 г. без НДС**

Статьи затрат	**Водогрейный котел**	**Камера сжигания дополнительного топлива с газовым подогревателем сетевой воды**
Основное оборудование, млн руб.	32,70*	18,56
Вспомогательное оборудование, млн руб.	7,36	2,38
Строительные работы, млн руб.	9,48	8,38
Транспортные расходы, млн руб.	1,89	1,68
Суммарные капитальные затраты, млн руб.	51,44	31,01

* с учетом стоимости дымовой трубы

По результатам расчетов получена зависимость величины относительной экономии топлива по сравнению с вариантом ПГУ-КЭС с водогрейным котлом от электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$ и температуры наружного воздуха $t_{нв}$ при теплофикационной нагрузке 34,2 МВт (рис. 7). Из анализа представленных данных видно, что наибольшая величина экономии наблюдается при низких нагрузках ГТУ и достигает величины 9,2 %, при номинальной нагрузке относительная экономия составляет 3,3 %.

По результатам анализа технико-экономического сравнения эффективности сделан вывод, что вариант модернизации котла-утилизатора экономичнее водогрейного котла. Это позволит уменьшить себестоимость отпускаемой тепловой энергии.

Конструкция газового подогревателя сетевой воды принята аналогичной газовому подогревателю конденсата, что позволит обеспечить их ремонтопригодность и взаимозаменяемость. Изменение наружного диаметра труб, поперечного и продольного шагов труб приведет к возмущениям газового потока, и, как следствие, увеличению аэродинамического сопротивления. Поэтому задача выбора оптимальной компоновки сужается до поиска количества рядов труб по ходу газов газового подогревателя сетевой воды, позволяющего обеспечить наилучшие технико-экономические показатели.

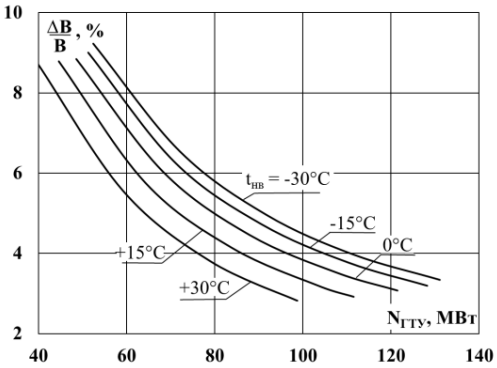


Рис. 7. Изменение относительной величины экономии топлива по сравнению с вариантом ПГУ-КЭС с водогрейным котлом в зависимости от нагрузки ГТУ $N_{ГТУ}$ и температуры наружного воздуха $t_{нв}$ при теплофикационной нагрузке 34,2 МВт

Показатели работы ГТУ зависят от параметров внешней среды, поэтому выбор теплофикационного оборудования в котле-утилизаторе для отпуска требуемого количества тепловой энергии необходимо осуществлять для параметров работы ГТУ при расчетной температуре наружного воздуха в регионе строительства станции.

В качестве критерия выбора оптимальной компоновки использован чистый дисконтированный доход (ЧДД). Расчетный анализ проведен относительно базового варианта с количеством труб по ходу газов $z_2 = 6$ для трех температур сетевой воды на выходе газового подогревателя сетевой воды – 150, 130 и 115 °С. На основании анализа результатов определено, что наиболее эффективной по экономическим показателям и обеспечению рабочего диапазона является температура сетевой воды, равная 150 °С. Оптимальное количество рядов труб по ходу газов в таком случае равняется 20-ти (рис. 8). Область диаграммы с учетом технических условий выделена фоном и ограничивается следующими линиями: слева – по максимально возможному расходу топлива в камеру сжигания дополнительного топлива, справа – по минимально возможной температуре уходящих газов по условиям работы газоходов, снизу - по минимально допустимой скорости сетевой воды. Оптимальным количеством рядов по ходу газов является наиболее приближенное целое число к пересечению линий двух ограничений - по максимальному расходу топлива в камеру сжигания дополнительного топлива и минимально допустимой температуре уходящих газов. С увеличением тепловой мощности $Q_{тф}$ максимум чистого дисконтированного дохода смещается в сторону

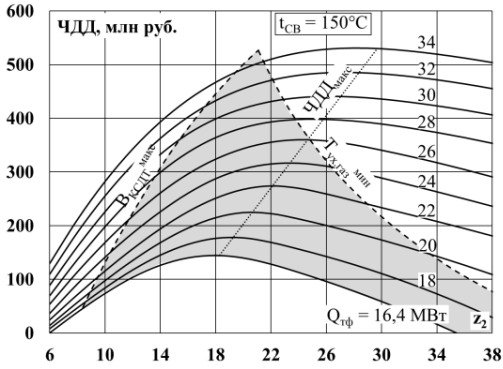


Рис. 8. Изменение ЧДД в зависимости от количества рядов труб по ходу газов z_2 и теплофикационной нагрузки $Q_{тф}$ при температуре сетевой воды $t_{св}$ 150 °С

увеличения z_2, за счет более высокой экономичности по отношению к базовому варианту. При уменьшении температуры сетевой воды на выходе из газового подогревателя сетевой воды область диаграммы с учетом технических ограничений сужается. Линии ограничения смещаются в сторону уменьшения числа рядов труб.

Четвертая глава включает анализ результатов исследований переменных режимов работы ПГУ с камерой сжигания дополнительного топлива и газовым подогревателем сетевой воды, режимов с добавлением воздуха в поток газов и автономной работы камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды, выбор способа регулирования тепловой мощности газового подогревателя сетевой воды, методику определения оптимальной компоновки газового подогревателя сетевой воды и параметров работы энергоблока с камерой сжигания дополнительного топлива.

Зависимость величины суммарного расхода топлива в ПГУ-КЭС с камерой сжигания дополнительного топлива определяется тремя составляющими:

- расходом топлива в камеру сгорания ГТУ;
- в камеру сжигания дополнительного топлива для теплофикации;
- дополнительным расходом топлива в камеру сгорания ГТУ на компенсирующую выработку электрической энергии (ввиду увеличения аэродинамического сопротивления газового тракта котла-утилизатора, и, как следствие, уменьшения электрической мощности ГТУ).

При значении тепловой мощности газового подогревателя сетевой воды 34,2 МВт суммарное увеличение расхода топлива на энергоустановку по сравнению с вариантом без камеры сжигания дополнительного топлива в режиме работы «моноблок» не превышает 0,6 кг/с. При постоянном значении тепловой мощности и температуры сетевой воды $t_{св}$ (по условию сопоставимости результатов) изменение относительной нагрузки ГТУ $n_{ГТУ}$ от 0,4 до 1,0 приводит к увеличению расхода топлива на 0,2 кг/с (рис. 9). Наименьший прирост расхода топлива наблюдается при низких значениях температуры наружного воздуха $t_{нв}$. Это обусловлено изменением параметров потока газов на входе в камеру сжигания дополнительного топлива и влиянием парогенерирующих поверхностей котла-утилизатора.

Предлагаемое компоновочное решение позволяет увеличить коэффициент использования теплоты топлива $\eta_{и.т}$ энергоблока ПГУ-325 в режиме работы «моноблок» (рис. 10):

- при относительной нагрузке ГТУ $n_{ГТУ}$ = 0,4: с 36,84 - 44,42 % до 48,27 – 57,53 %, т.е. на 11,43 – 13,11 % (диапазон изменения указан для $t_{нв}$ = -30 и +30 °С, соответственно);
- при $n_{ГТУ}$ = 1,0: с 48,44 – 54,86 % до 53,72 - 59,60 %, т.е. на 5,28 – 4,74 %;

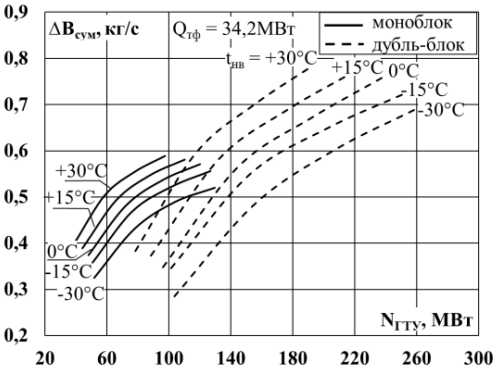


Рис. 9. Изменение величины расхода топлива дубль-блока ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива в зависимости от электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$, температуры наружного воздуха $t_{нв}$ и режима работы при тепловой мощности $Q_{тф}$ = 34,2 МВт

в режиме работы «дубль-блок»:

- при относительной нагрузке ГТУ $n_{ГТУ}$ = 0,4: с 36,76 - 44,35 % до 43,02 – 51,60 %, т.е. на 6,26 - 7,25 %;
- при $n_{ГТУ}$ = 1,0: с 48,28 – 54,45 % до 50,85 - 56,21 %, т.е. на 2,57 - 1,76 %.

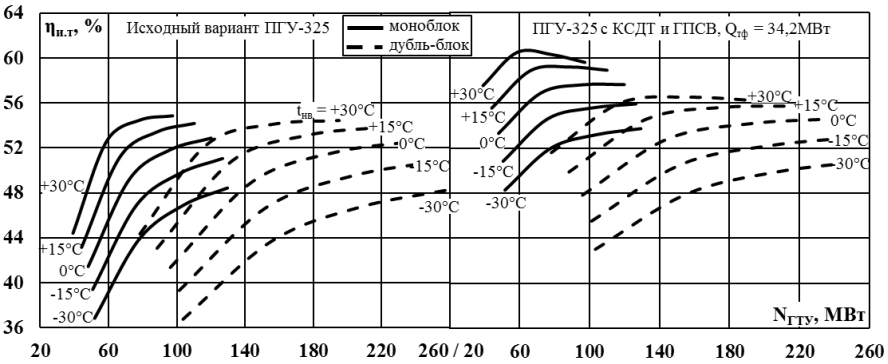


Рис. 10. Изменение коэффициента использования топлива $\eta_{и.т}$ дубль-блока ПГУ-325 в зависимости от электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$, режима работы (дубль-блок, моноблок) и температуры наружного воздуха $t_{нв}$ для двух вариантов котла-утилизатора – исходного и с применением камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды

Рост значения коэффициента использования теплоты топлива $\eta_{и.т}$ при увеличении температуры наружного воздуха $t_{нв}$ обусловлен изменением приращений величин мощности и КПД ГТУ. Изгиб графиков $\eta_{и.т}$ соответствует особенностям регулирования мощности ГТУ.

Конструкция предлагаемой модели котла-утилизатора позволяет осуществлять подачу воздуха для горения топлива с целью увеличения тепловой мощности газового подогревателя сетевой воды (при недостатке кислорода в выхлопных газах ГТУ) или для выработки тепловой энергии в случае останова ГТУ. Подачу к горелочным устройствам необходимого количества воздуха для сжигания топлива обеспечивает дутьевой вентилятор через специальные воздушные каналы. Выработка дополнительной тепловой мощности (выше проектной – 34,2 МВт) необходима в аварийных ситуациях при переключении тепловой нагрузки с остановленного оборудования на энергоблок с камерой сжигания дополнительного топлива и газовым подогревателем сетевой воды или при снижении температуры наружного воздуха $t_{нв}$ ниже расчетной величины. Из анализа проведенных расчетов сделан вывод, что режим работы с подачей дополнительного воздуха позволит получить дополнительную мощность 14,6 МВт с увеличением КПД котла-утилизатора на 0,76 %, коэффициента использования теплоты топлива – на 1,97 % при условии поддержания объемного содержания кислорода на уровне 12,5 %.

В автономном режиме работы камера сжигания дополнительного топлива и газовый подогреватель сетевой воды отделяются от остальных поверхностей нагрева котла-утилизатора с помощью газоплотных шиберов. Тепловая мощность газового подогревателя сетевой воды при температурах сетевой воды 150, 130 и 115 °С составляет 31,8, 27,8 и 23,6 МВт, соответственно. В автономном режиме снижается КПД брутто котла-утилизатора на 4,0 - 4,5 %, что обусловлено несовершенством конструкции оборудования и горелочных устройств для указанного режима эксплуатации.

На основе результатов исследовательской работы разработан алгоритм определения оптимальных параметров конструкции газового подогревателя сетевой воды и оценки соответствующих ей режимов работы оборудования для различных условий эксплуатации, реализованный в программном комплексе Microsoft Excel с использованием Visual Basic. Алгоритм жестко связан с технологической схемой предложенного компоновочного решения (рис. 1), а параметры исходных данных могут варьироваться в широких пределах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен комплекс исследований по определению рационального места расположения камеры сжигания дополнительного топлива в газоходе котла-утилизатора, режимов её работы и конструкции газового подогревателя сетевой воды применительно к технологической схеме ПГУ-КЭС.

2. В программном комплексе Flow Vision разработана имитационная модель камеры сжигания дополнительного топлива для количественного определения характеристик полноты сгорания топлива.

3. Получены новые расчетные данные об эффективности и устойчивости процесса горения природного газа в следующих диапазонах параметров потока выхлопных газов ГТУ: температуры от 90 до 150 °С и объемного содержания молекулярного кислорода от 12 до 17 %. Определена зависимость величины потери теплоты с химическим недожогом топлива от указанных режимных параметров, по результатам расчетов построена номограмма.

4. В программном комплексе Boiler Designer разработана модель энергоблока ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива и газовым подогревателем сетевой воды, обеспечивающая определение показателей эффективности его работы в различных режимах эксплуатации. Верификация модели выполнена с использованием результатов натурных испытаний оборудования в условиях филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация».

5. На основе вариантных расчетов установлено, что наиболее эффективной компоновкой газового тракта котла-утилизатора является последовательное расположение камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды за газовым подогревателем конденсата. Такой выбор обусловлен наименьшим влиянием указанных дополнительных элементов на работу паротурбинной части энергоблока и наибольшими значениями технико-экономических показателей работы оборудования.

6. Для выбранного варианта модернизации котла-утилизатора определены показатели экономической эффективности в сравнении с вариантом отпуска тепловой энергии от водогрейного котла. Выявлено, что наибольшая величина относительной экономии топлива при низких нагрузках ГТУ достигает величины 9,2 %, а при номинальной нагрузке ГТУ составляет 3,3 %. Кроме того, вариант модернизации котла-утилизатора требует меньших капитальных затрат - около 60 % от капитальных затрат на водогрейный котел.

7. Применительно к котлу-утилизатору марки «П-88» разработаны зависимости чистого дисконтированного дохода от тепловой нагрузки и температуры сетевой воды, позволяющие определять необходимое количество рядов труб, по конструкции аналогичных трубам газового подогревателя конденсата, по ходу газов газового подогревателя сетевой воды.

8. Определены технико-экономические показатели работы энергоблока с выбранной компоновкой поверхностей нагрева котла-утилизатора в режимах частичных нагрузок ГТУ и при различных температурах наружного воздуха. Установлено, что применение камеры сжигания дополнительного топлива на ПГУ-КЭС для теплофикации увеличит коэффициент использования топлива энергоблока на 3,8 - 13,7 %.

9. Выполнен анализ технико-экономических показателей работы оборудования в автономном режиме (в случае остановленной ГТУ) и в режиме

с подачей воздуха в поток газов. В автономном режиме КПД брутто котла-утилизатора уменьшается на 4 - 4,5 %. Режим работы с подачей воздуха позволяет не только получить дополнительную мощность 14,6 МВт, но и увеличить КПД брутто котла-утилизатора на 0,76 %.

10. Разработан алгоритм выбора для различных условий эксплуатации наиболее эффективных параметров конструкции газового подогревателя сетевой воды и расчета соответствующих ей технико-экономических показателей работы оборудования энергоблока.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Шелыгин, Б.Л. Определение условий использования в качестве окислителя уходящих из котла-утилизатора газов для сжигания дополнительного топлива / Б.Л. Шелыгин, А.В. Мошкарин, **Е.С. Малков** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2012. - вып. 2. - С.4-7.

2. Шелыгин, Б.Л. Тепловая эффективность использования уходящих газов котла-утилизатора при сжигании дополнительного топлива / Б.Л. Шелыгин, А.В. Мошкарин, **Е.С. Малков** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2012. - вып. 4. - С. 8-12.

3. Шелыгин, Б.Л. Анализ эффективности теплогенерирующей установки в переменных режимах работы при сжигании дополнительного топлива за котлом-утилизатором / Б.Л. Шелыгин, **Е.С. Малков** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2012. - вып. 6. - С. 5-9.

4. **Малков, Е.С.** Разработка расчетных моделей котла-утилизатора для анализа эффективности сжигания дополнительного топлива / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2013. - вып. 1. - С. 15-18.

5. **Малков, Е.С.** Технико-экономическое обоснование установки газового подогревателя сетевой воды в газоходе котла-утилизатора / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин, А.Ю. Костерин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2013. - вып. 2. - С. 9-14.

6. **Малков, Е.С.** Сравнение компоновок камеры сжигания дополнительного топлива и теплообменных поверхностей в газоходе котла-утилизатора / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2013. - вып. 3. - С. 5-8.

7. **Малков, Е.С.** Оптимизация компоновки газового подогревателя сетевой воды в газоходе котла-утилизатора / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин, А.Ю. Костерин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2013. - вып. 5. - С. 5-8.

8. **Малков, Е.С.** Оценка величины потерь теплоты от химического недожога топлива / **Е.С. Малков** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2014. - вып. 1. - С. 10-15.

9. **Малков, Е.С.** Анализ показателей работы ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива при переменных нагрузках газотурбинной установки / **Е.С. Малков** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та - 2014. – вып. 3. – С. 5-8.

10. **Патент №133566** Российская Федерация МПК F01K21/04 Парогазовая установка / Б.Л. Шелыгин, **Е.С. Малков**; опубл. 20.10.2013.

Публикации в других изданиях

11. **Малков, Е.С.** Оценка возможностей использования уходящих газов котлов-утилизаторов для сжигания дополнительного топлива / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин, А.В. Мошкарин // Материалы Седьмой междунар. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2012». 17-19 апреля 2012 г. в 7 т. Т.1, Ч.1 - Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2012. – 167 с. С. 23-27.

12. **Малков, Е.С.** Сравнение вариантов дополнительного сжигания топлива на ПГУ-ТЭЦ / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин, А.В. Мошкарин // Материалы Седьмой междунар. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2012». 17-19 апреля 2012 г. в 3 т. Т.1, Ч.1 - Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2012. – 167 с. С. 27-29.

13. **Малков, Е.С.** Повышение эффективности энергоустановки за счет использования уходящих газов котлов-утилизаторов / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы Всерос. науч-практ. конф. «Энергосбережение в промышленности», Чебоксары, 21-22 апреля 2012 г. - Чебоксары: Чуваш. ун-т, 2012. - 154 с. С. 100-103.

14. **Малков, Е.С.** Оценка эффективности газоводяного теплообменника при сжигании дополнительного топлива в котле-утилизаторе / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы Всерос. науч-практ. конф. «Энергосбережение в промышленности», Чебоксары, 21-22 апреля 2012 г. - Чебоксары: Чуваш. ун-т, 2012. - 154 с. С. 103-105.

15. **Малков, Е.С.** Анализ эффективности сжигания дополнительного топлива при размещении за котлом-утилизатором газоводяного теплообменника / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Тез. докл. Специализ. научн.-практ. конф. молодых специалистов, посвященная 125-летию со дня рождения Л.К. Рамзина «Современные технологиии в энергетике - основа повышения надежности, эффективности и безопасности оборудования ТЭС». - М.: ОАО «ВТИ», 2012. – 434 с. С. 121-125.

16. **Малков, Е.С.** Влияние температуры уходящих газов котла-утилизатора на характеристики парогазовой установки при использовании дополнительного газоводяного теплообменника / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы Междунар. молодежн. научн. школы «Энергосбережение - теория и практика», 11-12 сентября 2012 г. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехн. ун-т., изд-во ООО «СПБ Графикс», 2012. – 209 с. С. 56-60.

17. **Малков, Е.С.** Разработка расчетных моделей для выбора оптимального варианта использования уходящих газов котла-утилизатора «П-88» / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Тез. докл. XIX Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 4 т. Т.4. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 334 с. С. 81.

18. **Малков, Е.С.** Оценка потенциала уходящих газов котла-утилизатора «П-88» / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Тез. докл. XIX Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 4 т. Т.4. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 334 с. С. 82.

19. **Малков, Е.С.** Анализ работы котла-утилизатора в переменных режимах при сжигании дополнительного топлива / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы VIII Междунар. молодежн. научн. конф. «Тинчуринские чтения», 27-29 марта 2013 г. / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю.Абдуллазянова. В 4 т. Т 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 220 с. С. 194-195.

20. **Малков, Е.С.** Разработка расчетных моделей парогазовой установки для анализа эффективности применения камеры сжигания дополнительного топлива / **Е.С. Малков**, О.А. Беляева, Б.Л. Шелыгин // Сб. научн. тр. Шестой Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 21-22 апреля 2013 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 428 с. С. 177-180.

21. **Малков, Е.С.** Сравнение компоновок низкотемпературных поверхностей нагрева в газоходе котла-утилизатора // **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы Восьмой междунар. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». 23-25 апреля 2013 г. в 7 т. Т.1, Ч.1 - Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2013. – 252 с. С. 75-79.

22. **Малков, Е.С.** Технико-экономическое сравнение установки газового подогревателя сетевой воды в котле-утилизаторе со строительством водогрейного котла // **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы Восьмой междунар. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». 23-25 апреля 2013 г. в 7 т. Т.1, Ч.1 - Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2013. – 252 с. С. 79-83.

23. **Малков, Е.С.** Вопросы технико-экономического обоснования применения камеры дожигания на ПГУ-КЭС для нужд теплофикации // **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы международной научн.-техн. конф. студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере». Челябинск, 22-26 апреля 2013 г. / Под ред. Е.В. Топорова. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – 313 с. С. 205-206.

24. **Малков, Е.С.** Анализ эффективности работы котла-утилизатора в переменных режимах при использовании камеры сжигания дополнительного топлива для нужд теплофикации // **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Материалы междунар. науч. – техн. конф. «XVII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново, 29-31 мая 2013 г. В 2 т. Т 2 / Под. ред. С.В. Тарарыкина, В.В. Тютикова, В.А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина», 2013. – 363 с. С. 28-31.

25. **Малков, Е.С.** Моделирование горения в камере сжигания дополнительного топлива / **Е.С. Малков**, Б.Л. Шелыгин // Тез. докл. XX Междунар. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 4 т. Т.4. – М.: Изд. дом МЭИ, 2014. – 372 с. С. 86.

МАЛКОВ Евгений Сергеевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И СХЕМЫ ПГУ-КЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ КАМЕРЫ СЖИГАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОФИКАЦИИ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать _____ . Формат $60x84^{1}/_{16}$

Печать плоская. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № ___ .

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ