

На правах рукописи



ХУТОРНЕНКО  
Сергей Николаевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СТУПЕНЧАТОГО ПОДОГРЕВА  
КОНДЕНСАТА В КОТЛАХ-УТИЛИЗАТОРАХ  
ДЛЯ ПАРОГАЗОВЫХ ЭНЕРГООБЛОКОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования

«Алтайский государственный технический университет

им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель кандидат технических наук, профессор,  
**Фурсов Иван Дмитриевич**

Официальные оппоненты: **Клер Александр Матвеевич**  
доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук,  
Заведующий отделом Теплосиловых систем

**Цепенюк Алексей Иванович**  
кандидат технических наук,  
Общество с ограниченной ответственностью «ЗиО-КОТЭС»,  
Генеральный директор

Ведущая организация Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена трудового красного знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»),  
г. Москва

Защита состоится «26» мая 2017 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Чичиндаев Александр Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Энергетика России представляет собой основополагающую отрасль страны. На сегодняшний день одним из перспективных путей повышения энергостабильности и энергоэффективности России является строительство новых газовых энергоблоков по комбинированному циклу или замещение ими выбывающих из эксплуатации паросиловых газовых энергоблоков. Согласно энергетической стратегии России одним из целевых показателей программы модернизации электроэнергетики России на период до 2020 года является увеличение установленной мощности газовых ТЭС с применением передовых технологий на основе ПГУ. При проектировании основного оборудования для энергоблоков ПГУ особое внимание уделяется повышению эффективности энергоблока. Одним из возможных путей повышения эффективности блока является снижение затрат электроэнергии на собственные нужды. Изучение роли затрат электроэнергии на собственные нужды имеет большое значение, поскольку этот вид потерь напрямую влияет на технико-экономические показатели электростанции. В то же время вопрос снижения затрат электроэнергии на собственные нужды, не получил до настоящего времени подробного освещения ни в российских, ни и зарубежных работах. При этом потенциал энергосбережения по электростанциям России оценивается на уровне 5-6 млрд. кВт·ч.

**Объект исследования** В данной работе исследованы теплофикационные энергоблоки ТЭЦ, работающие по бинарному циклу (ПГУ) с газовыми подогревателями конденсата (ГПК).

**Предмет исследования:** схемные и конструктивные решения для газового подогревателя конденсата (ГПК) котла-утилизатора (КУ) и теоретическое подтверждение возможности применения выдвигаемых решений на практике.

**Целью** диссертации является разработка методических подходов, математических моделей, методов расчета и исследования технико-экономических показателей, конструктивно-компоновочных параметров тех-

нологически новой схемы газового подогревателя конденсата для энергоблоков ПГУ.

**Задачи исследования:**

1. Разработка методики численного исследования технологической схемы газового подогревателя конденсата с применением ступенчатого подогрева конденсата.
2. Разработка математической модели газового подогревателя конденсата с учётом особенностей технологии ступенчатого подогрева.
3. Разработка методики теплового расчёта тракта ГПК с применением технологии ступенчатого подогрева конденсата.
4. Разработка рекомендаций по выбору конструктивно-компоновочных параметров ступеней ГПК.
5. Оценка технико-экономических показателей рассматриваемой в исследовании теплогидравлической схемы ГПК.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Разработанный методический подход к исследованию технологической схемы ступенчатого подогрева конденсата, который учитывает влияние относительного тепловосприятия водо-водяного теплообменника (ВВТО) и температуры конденсата на входе в котёл-утилизатор на величины относительного тепловосприятия поверхностей нагрева ГПК.
2. Разработанная методика теплового расчёта газового подогревателя конденсата с применением ступенчатого подогрева рабочего тела.
3. Разработанная математическая модель газового подогревателя конденсата, которая учитывает зависимости величин относительного тепловосприятия поверхностей нагрева ГПК от относительного тепловосприятия водо-водяного теплообменника и температуры конденсата на входе в КУ.
4. Разработанная технологическая схема газового подогревателя конденсата, позволяющая повысить эффективность производства электрической энергии путём снижения затрат электроэнергии на собственные нужды КУ.

5. Разработанные рекомендации по выбору конструктивных решений относительно ступеней ГПК.

**Методы исследования:** расчетно-аналитические, экспериментальные методы, математическое моделирование тепловых процессов.

**Практическая значимость работы.** Разработанная методика теплового расчёта ступеней ГПК в совокупности с рекомендациями по конструктивно-компоновочным решениям позволяют получить экономию металла при изготовлении поверхностей нагрева.

**Личный вклад автора.** Все положения диссертационного исследования, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на других авторов, получены лично автором. Анализ и обсуждение полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

**Достоверность** результатов и выводов диссертационной работы обосновывается использованием разработанных методик (основанных на экспериментальных данных и нормативных методах), фундаментальных закономерностей технической термодинамики, гидрогазодинамики, теплопередачи. Математическое моделирование выполнено с применением лицензионного, сертифицированного программного продукта Boiler Designer, хорошо себя зарекомендовавшем при решении ряда задач подобного рода.

**Апробация работы.** Результаты работы обсуждались на научно-практической конференции “Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы” (г. Челябинск, 2011), на 72-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета (г. Барнаул, 2014), на всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2013, 2014), на всероссийской научно-технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (г. Рубцовск, 2015), на всероссийской научной конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2015, 2016), на всероссийской научно-технической конферен-

ции с международным участием «Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность» (г. Томск, 2015), на восьмой всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2016» (г. Москва, 2016), на седьмой конференции молодых специалистов инженерно-технических подразделений ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург, 2016).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 8 печатных изданиях: из них 4 – статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, 4 – в отраслевых изданиях и сборниках трудов конференций.

**Структура и объём работы.** Диссертация включает в себя введение, пять разделов, заключение, список использованных сокращений, термины и определения, список литературы из 59 наименований, 10 приложений, 56 рисунков, 25 таблиц. Основной текст диссертации изложен на 133 страницах, общий объём диссертации составляет 143 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы.

В **первой главе** выполнен обзор схем существующих энергоблоков, работающих по комбинированному циклу, рассмотрены особенности теплового расчёта КУ, определены возможности снижения затрат электроэнергии на собственные нужды энергоблока путём преобразования тепловой схемы КУ. На основании анализа сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** приводится описание КУ, предназначенного для работы в составе энергоблока ПГУ-230, на базе которого выполнены основные исследования. Разработано технологическое решение относительно ГПК с целью исключения системы рециркуляции конденсата, что позволяет снизить эксплуатационные затраты энергоблока.

Основной идеей рассматриваемой в диссертационном исследовании технологической схемы является введение промежуточной ступени для предварительного подогрева части конденсата и смешением его с основным потоком конденсата перед подачей в КУ. Для этого потребовалось разделить всю поверхность нагрева ГПК на три ступени:

1. Входная по конденсату ступень – ГПК1;
2. Промежуточная ступень для подогрева конденсата – ПромСт;
3. Выходная по конденсату ступень – ГПК2.

Принципиальная гидравлическая схема ГПК и схема расположения поверхностей нагрева в газоходе приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

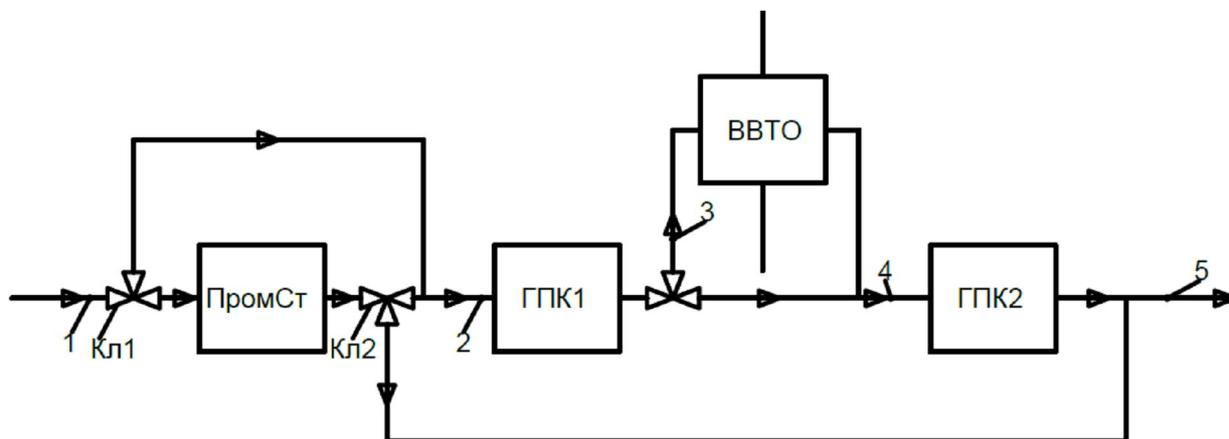


Рисунок 1 – Гидравлическая схема ГПК

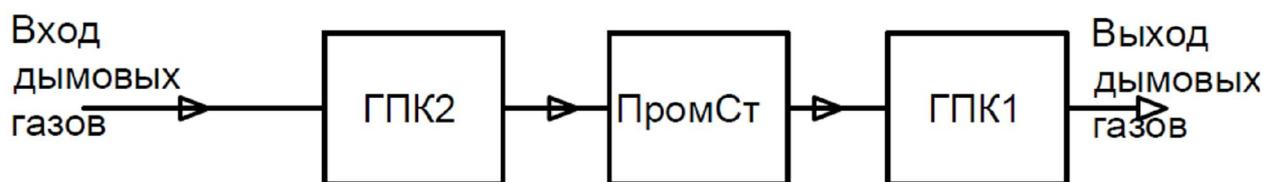


Рисунок 2 – Схема газового тракта ГПК

Движение рабочей среды (конденсата) в тракте ГПК осуществляется следующим образом. Основной поток холодного конденсата идет во входную ступень (ГПК1), параллельно входному трубопроводу включена промежуточная ступень (ПромСт) в которой осуществляется подогрев конденсата. Тепловая нагрузка промступени при этом равна количеству тепловой энергии необ-

ходимой для подогрева всего количества конденсата перед подачей в ГПК1 до температуры не ниже 60 °С. Регулирование расхода конденсата через промежуточную ступень, соответственно и её тепловой нагрузки, осуществляется при помощи трехходового клапана на входе (Кл1). Далее подогретый конденсат с температурой 60 °С поступает в ГПК1. Конденсат после подогрева в ГПК1 направляется в ВВТО, где происходит нагрев сетевой воды. Для окончательного нагрева, перед подачей в деаэрактор, конденсат направляется в ГПК2. Традиционно в схемах ГПК предусматривают байпас холодного конденсата для поддержания недогрева до кипения перед деаэрактором. В предлагаемой схеме байпасирование осуществляется не холодного, а частично подогретого в промступени конденсата. Такое решение обусловлено тем, что в режимах, когда температура конденсата за конденсатором паровой турбины приближается к 60 °С и выше, т.е. не требуется дополнительного подогрева, тепловая нагрузка, а соответственно и расход конденсата через промступень будет приближаться к нулю. Работа промступени в безрасходном режиме не предусматривается. Регулирование расхода конденсата через байпасную линию осуществляется с помощью трехходового клапана (Кл2).

В третьей главе обоснована и разработана методика теплового расчета тракта ГПК с применением технологии ступенчатого подогрева конденсата.

Разработанная методика теплового расчёта основана на положениях нормативного метода и дополнена эмпирическими зависимостями рационального распределения тепловосприятости по ступеням ГПК. Так, например, при помощи величин относительного тепловосприятости ступеней ГПК определяются значения температур конденсата и дымовых газов в балансовых точках:

Относительное тепловосприятие ступени в данном случае определяется как функция от исходных данных

$$q_i = f(q_{ВВТО}; t_k),$$

где  $q_{ВВТО}$  – относительное тепловосприятие ВВТО, кВт,

$t_k$  – температура конденсата на входе в ГПК.

Энтальпия конденсата на выходе из ступени:

$$h_i^{вых} = h_i^{вх} + \frac{q_i \cdot Q_{ГПК}}{D_i}$$

Энтальпия конденсата на входе в ступень:

$$h_i^{вх} = h_i^{вых} - \frac{q_i \cdot Q_{ГПК}}{D_i}$$

где  $q_i$  – относительное тепловосприятие  $i$ -й ступени ГПК, кВт;

$D_i$  – Расход конденсата через ступень ГПК, кг/с;

$i$  – Наименование ступени ГПК.

Значения температуры конденсата в указанных точках определяются по таблицам теплофизических свойств воды в зависимости от  $h_i^{вых/вх}$  и  $P_i^{вых}$ .

Значения температуры газов по тракту могут быть определены по упрощённой формуле

$$g = \frac{Q_z}{(v_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + v_{N_2} \cdot c_{N_2} + v_{O_2} \cdot c_{O_2} + v_{H_2O} \cdot c_{H_2O}) \cdot V_z}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $Q_z$  - количество тепловой энергии дымовых газов в данном сечении, кВт;

$v_{CO_2}; v_{N_2}; v_{O_2}; v_{H_2O}$  - объёмная доля компонентов дымовых газов;

$c_{CO_2}; c_{N_2}; c_{O_2}; c_{H_2O}$  - средняя теплоёмкость газов;

$V_z$  - расход дымовых газов, м<sup>3</sup>/с.

Средняя теплоёмкость газов определяется по таблице V Нормативного метода.

Количество тепловой энергии дымовых газов в балансовых сечениях сечения определяется по формулам:

- на входе в тракт ГПК:

$$Q'_{z,ГПК} = (v_{CO_2} \cdot (c \cdot g')_{CO_2} + v_{N_2} \cdot (c \cdot g')_{N_2} + v_{O_2} \cdot (c \cdot g')_{O_2} + v_{H_2O} \cdot (c \cdot g')_{H_2O}) \cdot V_z, \text{ кВт}$$

- на выходе из ГПК2:

$$Q''_{z,ГПК2} = Q'_{z,ГПК} - Q_{ГПК2}, \text{ кВт}$$

- на выходе из промступени:

$$Q_{\text{э.ПромСт}}'' = Q_{\text{э.ГПК2}}'' - Q_{\text{ПромСт}}, \text{ кВт}$$

- на выходе из ГПК1 (из тракта ГПК):

$$Q_{\text{э.ГПК1}}'' = Q_{\text{э.ПромСт}}'' - Q_{\text{ГПК1}}, \text{ кВт}$$

Тепловосприятие по ступеням ГПК определяется соотношением:

$$Q_i = q_i \cdot Q_{\text{ГПК}}, \text{ кВт}$$

где  $Q_i$  – тепловосприятие ступени, кВт,

$q_i$  - относительное тепловосприятие ступени,

$Q_{\text{ГПК}}$  – полная тепловая нагрузка ГПК (с учётом нагрузки ВВТО), кВт.

Расчётная мощность электропривода насоса рециркуляции конденсата определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{РЭН}} = \left[ D_{\kappa} \left( \frac{h_{\kappa}^{\text{вых}} - h_{\kappa}^{\text{вх}}}{h_{\text{ГПК}}^{\text{вых}} - h_{\text{ГПК}}^{\text{вх}}} - 1 \right) + q_{\text{ВВТО}} \frac{Q_{\text{ГПК}}}{h_{\text{ГПК}}^{\text{вых}} - h_{\text{ГПК}}^{\text{вх}}} + D_{\sigma} \right] \frac{(\Delta p_{\text{ГПК}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{ВВТО}}) \cdot v_{\text{ср}}}{\eta_{\text{н}}}, \text{ кВт}$$

где  $h_{\kappa}^{\text{вых}}$  - энтальпия конденсата на выходе из тракта ГПК, кДж/кг;

$h_{\kappa}^{\text{вх}}$  - энтальпия конденсата на входе в тракт ГПК, кДж/кг;

$h_{\text{ГПК}}^{\text{вых}}$  - энтальпия конденсата на выходе из поверхности нагрева, кДж/кг;

$h_{\text{ГПК}}^{\text{вх}}$  - энтальпия конденсата на входе в поверхность нагрева, кДж/кг;

$p_{\text{ГПК}}^{\text{вх}}$  - давление конденсата на входе в поверхность нагрева ГПК, МПа;

$\Delta p_{\text{отв}}$  - сопротивление трубопроводов отвода конденсата, МПа;

$\Delta p_{\text{ВВТО}}$  - сопротивление водо-водяного теплообменника, МПа.

Изменение расчётной мощности конденсатного электронасоса может быть оценено по следующей формуле:

$$\Delta N_{\text{КЭН}} = N_{\text{ГПК.рц}}^{\text{э}} - N_{\text{ГПК.нов}}^{\text{э}} = D_{\kappa} \cdot \frac{(\Delta p_{\text{ГПК.рц}} - \Delta p_{\text{ГПК.нов}}) \cdot v_{\text{ср}}}{\eta_{\text{н}}}, \text{ кВт}$$

где  $N_{\text{ГПК.рц}}^{\text{э}} / N_{\text{ГПК.нов}}^{\text{э}}$  - эквивалентная мощность насоса необходимая для подачи всего количества конденсата и преодоления сопротивления ГПК с рециркуляцией и эквивалентная мощность насоса необходимая для подачи всего количества конденсата и

преодоления сопротивления ГПК с применением новой технологической схемы, кВт;

$\Delta p_{ГПК.рц} / \Delta p_{ГПК.нов}$  - сопротивление ГПК с рециркуляцией и сопротивление ГПК с применением новой технологической схемы, МПа.

При оценке снижения металлоёмкости ГПК с применением технологически новой схемы относительно схемы ГПК с рециркуляцией необходимо обязательное выполнение условия соотношения:

$$\frac{F_{ГПК}^{нов}}{F_{ГПК}^{рц}} \leq 1$$

где  $F_{ГПК}^{нов}$  - поверхность нагрева с применением ступенчатого подогрева, м<sup>2</sup>;

$F_{ГПК}^{рц}$  - поверхность нагрева с применением схемы с рециркуляцией, м<sup>2</sup>.

Учитывая особенности теплообмена в поверхностях нагрева ГПК с применением технологии ступенчатого подогрева конденсата определено, что поверхность нагрева ГПК1 работает при меньшем температурном напоре, чем соответствующая часть поверхности нагрева ГПК с рециркуляцией, в соответствии с этим определены сценарные условия, при которых относительное тепловосприятие ГПК1 будет меньше некоего максимального значения. Для этого необходимо определить, что:

- поверхность нагрева ГПК с применением технологии ступенчатого подогрева конденсата:

$$F_{ГПК}^{нов} = \frac{q_{ГПК2} \cdot Q_{ГПК}}{k_{ГПК2} \cdot \Delta t_{ГПК2}} + \frac{q_{ГПК1} \cdot Q_{ГПК}}{k_{ГПК1} \cdot \Delta t_{ГПК1}} + \frac{q_{ПромСт} \cdot Q_{ГПК}}{k_{ПромСт} \cdot \Delta t_{ПромСт}}, \text{ м}^2$$

- поверхность нагрева ГПК с применением схемы с рециркуляцией:

$$F_{ГПК}^{рц} = \frac{Q_{ГПК}}{k_{ГПК}^{рц} \cdot \Delta t_{ГПК}^{рц}}, \text{ м}^2$$

Используя данные соотношения для условия снижения металлоёмкости ГПК с применением ступенчатого подогрева, установлено следующее сценарное условие:

$$q_{ГПК1} \leq \frac{k_{ГПК1} \cdot \Delta t_{ГПК1}}{k_{ГПК}^{рц} \cdot \Delta t_{ГПК}^{рц}} - q_{ГПК2} \frac{k_{ГПК1} \cdot \Delta t_{ГПК1}}{k_{ГПК2} \cdot \Delta t_{ГПК2}} - q_{ПромСт} \frac{k_{ГПК1} \cdot \Delta t_{ГПК1}}{k_{ПромСт} \cdot \Delta t_{ПромСт}}$$

где  $k_{ГПК1}/k_{ГПК2}/k_{ПромСт}/k_{ГПК}^{пу}$  - коэффициент теплопередачи ГПК1, ГПК2, пром-ступени и ГПК с рециркуляцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t_{ГПК1}/\Delta t_{ГПК2}/\Delta t_{ПромСт}/\Delta t_{ГПК}^{пу}$  - температурный напор ГПК1, ГПК2, промступени и ГПК с рециркуляцией, К.

Соответственно правая часть неравенства является максимальным значением относительного тепловосприятия ГПК1 и превышение этого значения говорит о том, что при применении ступенчатого подогрева конденсата будет перерасход металла на изготовление поверхностей нагрева относительно ГПК с применением схемы с рециркуляцией.

В четвёртой главе выполнено исследование режимов работы ГПК с применением технологии ступенчатого подогрева конденсата и определены зависимости относительного тепловосприятия ступеней ГПК от исходных данных (относительное тепловосприятие ВВТО и температура конденсата на входе в КУ).

Для определения эксплуатационных характеристик предлагаемой схемы выполнена серия расчётов с различными исходными данными. Результатом определения эксплуатационных характеристик являются полученные зависимости относительного тепловосприятия ступеней от исходных данных.

На рисунке 3 приведено семейство кривых отображающих зависимость относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО при различных значениях температуры конденсата на входе в КУ.

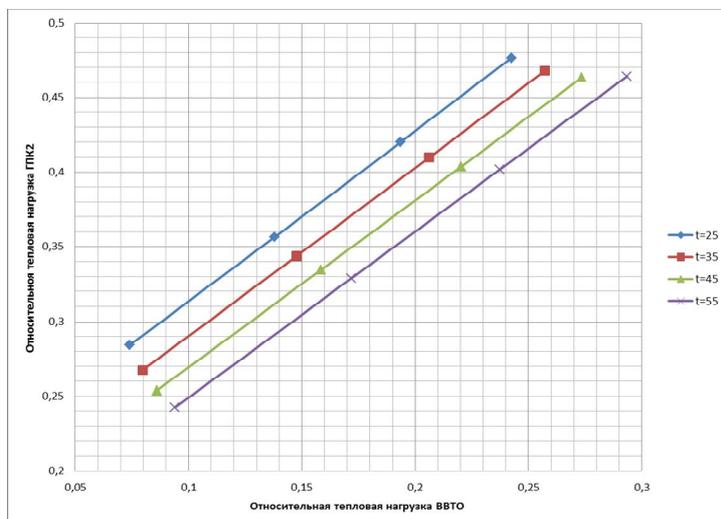


Рисунок 3 – Зависимость относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО при различных температурах конденсата на входе в КУ

Анализ рисунка 3 показывает, что зависимость относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО носит линейный характер при различных значениях температуры конденсата, т.е. функция имеет вид

$$q_{\text{ГПК2}} = k \cdot q_{\text{ВВТО}} + b \quad (1)$$

Отыскание коэффициентов  $k$  и  $b$  при различных температурах конденсата выполнено с помощью метода наименьших квадратов, значения этих коэффициентов приведено в таблице 2

Таблица 1 Значения коэффициентов  $k$  и  $b$  в зависимости от температуры конденсата на входе в КУ

Параметр/коэффициент	Значение			
	25	35	45	55
Температура конденсата, °С				
Коэффициент $k$	1,1415	1,1268	1,1159	1,1103
Коэффициент $b$	0,1997	0,1778	0,1579	0,1381

Поскольку коэффициенты  $k$  и  $b$  являются функциями температуры конденсата на входе в котёл-утилизатор, то для вывода универсальной зависимости относительной нагрузки ГПК2 найдены решения следующих функций:

$$k = f_1(t_k)$$

$$b = f_2(t_k)$$

где  $t_k$  – температура конденсата на входе в котёл-утилизатор.

Установлено, что зависимости изменения коэффициентов  $k$  и  $b$  от температуры конденсата на входе описываются следующими функциями:

1) коэффициент  $k$  описывается полиномом второй степени:

$$k = a \cdot t_k^2 + b \cdot t_k + c \quad (2)$$

2) коэффициент  $b$  описывается линейной функцией:

$$b = n \cdot t_k + m \quad (3)$$

Для определения неизвестных коэффициентов в формулах приведённых выше применён метод наименьших квадратов, по результатам получена

универсальная зависимость относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО и температуры конденсата на входе в КУ:

$$q_{ГПК2} = (2,3 \cdot 10^{-5} \cdot t_k^2 - 0,0028 \cdot t_k + 1,1979) \cdot q_{ВВТО} + (-0,002 \cdot t_k + 0,25) \quad (4)$$

Графические зависимости относительной нагрузки ГПК1 и промступени от относительной нагрузки ВВТО и температуры конденсата на входе в котёл-утилизатор и представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

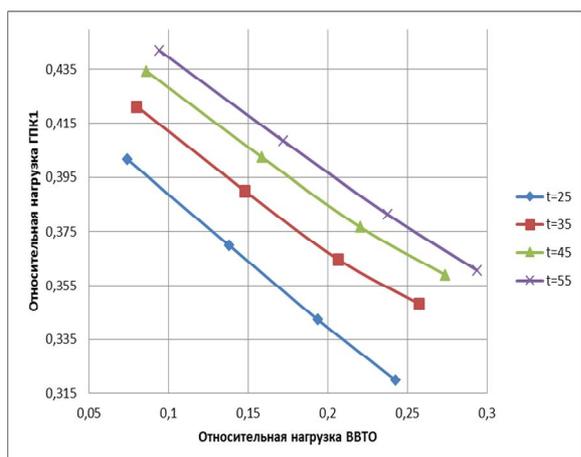


Рисунок 4 – Зависимость относительной нагрузки ГПК1 от относительной нагрузки ВВТО при различных температурах конденсата

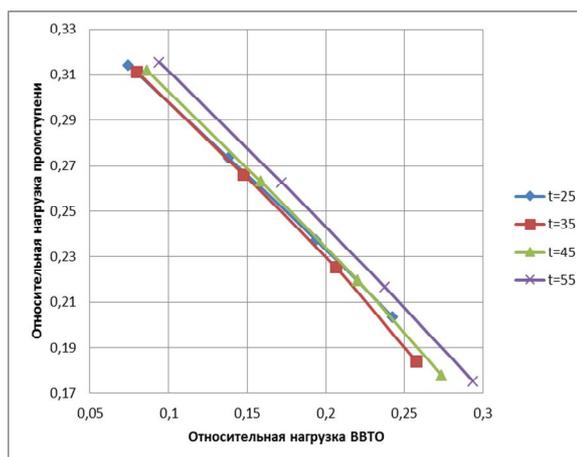


Рисунок 5 – Зависимость относительной нагрузки промступени от относительной нагрузки ВВТО при различных температурах конденсата

Из анализа рисунков 4 и 5 видно, что зависимость относительной нагрузки ГПК1 и промступени от относительной нагрузки ВВТО изменяется по различным законам в зависимости от температуры конденсата на входе в котёл-утилизатор. Данное явление объясняется особенностью теплогидравлической схемы ГПК. Таким образом, определён общий подход к решению поставленной задачи. Определение тепловосприятия по ступеням в данном случае выполнено при одновременном решении тепловых и материальных балансов по элементам с применением полученной ранее зависимости относительного тепловосприятия ГПК2. Ниже приведены универсальные зависимости относительной нагрузки ГПК1 и промступени в зависимости от относительной нагрузки ВВТО и температуры конденсата на входе в КУ.

Относительное тепловосприятие ГПК1:

$$q_{ГПК1} = \frac{D_k \cdot (h_{ГПК2}^{6yx} - h_{ГПК1}^{6x})}{Q_{ГПК}} - q_{ГПК2} + q_{ВВТО}$$

Относительное тепловосприятие промступени:

$$q_{ПромСт} = 1 - q_{ГПК1} - q_{ГПК2} = 1 - \frac{D_k \cdot (h_{ГПК2}^{6yx} - h_{ГПК1}^{6x})}{Q_{ГПК}} - q_{ВВТО}$$

Проработаны конструктивные решения касательно выбора диаметра труб для поверхности нагрева промступени. Для этого выполнена серия тепловых расчётов с определением температуры стенки трубы, в качестве переменной величины при этом принят диаметр труб, составляющих поверхность нагрева, при прочих равных условиях. По результатам расчётов сделан вывод, что при проектировании промступени для ГПК включенного по новой технологической схеме необходимо искать конструктивные решения, которые позволят снизить скорость нагреваемого теплоносителя во входной части промступени.

В **пятой главе** с целью подтверждения вариативности применения технологии ступенчатого подогрева конденсата выполнена разработка ГПК для двух действующих котлов-утилизаторов. Для этого приняты два энергоблока с номинальной нагрузкой 110 и 410 МВт.

В первом случае критерием определения возможности применения ступенчатого подогрева является сравнение результатов математического моделирования тепловых процессов протекающих в ГПК с применением различных схем. Результаты математического моделирования показывают возможность применения разработанной автором технологической схемы ГПК для данного энергоблока. При этом оценка эффективности применения новой технологической схемы ГПК показала, что увеличивается расчётная мощность на привод КЭН и РЭН на 1 кВт, , а так же этом наблюдается увеличение массы металла поверхности нагрева ГПК на 10,7%, но при этом исключается линия рециркуляции конденсата и её элементы.

Во втором случае имеется преимущество во всех отношениях, а именно: снижение затрат электроэнергии на собственные примерно 16,5 кВт и исключение из комплекта поставки двух насосов рециркуляции конденсата, элементов электротехнического обеспечения линии рециркуляции конденсата, снижение массы поверхности нагрева на 14,8%.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В качестве выводов по диссертационной работе приводятся следующие основные результаты

1. Обоснована и разработана методика численного исследования технологии ступенчатого подогрева конденсата. Показано, влияние исходных параметров на величины относительного тепловосприятия ступеней газового подогревателя конденсата.

2. Разработана и апробирована математическая модель газового подогревателя конденсата с учётом особенностей технологии ступенчатого подогрева. Впервые получены с применением разработанной математической модели зависимости относительного тепловосприятия ступеней ГПК от относительного тепловосприятия водо-водяного теплообменника при различных значениях температуры конденсата на входе в котёл-утилизатор.

3. Обоснована и разработана методика теплового расчета тракта ГПК с применением технологии ступенчатого подогрева конденсата, позволяющая получить рациональное распределение тепловосприятия по ступеням ГПК, а так же обеспечить требуемые технологические параметры при различных нагрузках энергоблока.

4. Результаты многовариантных расчетов показали, что при выборе конструктивно-компоновочных параметров промежуточной ступени следует ориентироваться на трубы относительно большого диаметра, что позволяет повысить температуру стенки трубы и, соответственно, обеспечить бескоррозионный режим работы промступени.

5. Разработаны и проверены критерии оценки технико-

экономических показателей технологической схемы ступенчатого подогрева конденсата. Показаны сценарные условия, при которых применение технологии ступенчатого подогрева конденсата имеет преимущество в виде экономии металла при изготовлении поверхности нагрева ГПК.

6. Показана количественная оценка эффективности применения технологии ступенчатого подогрева конденсата на примере энергоблока ПГУ-230. Экономия металла для изготовления поверхностей нагрева ГПК составляет примерно 20 тонн (более 13% от общей массы ГПК), годовая экономия электроэнергии собственных нужд более 85 тыс.кВт·ч, что составляет примерно 0,6 % от общего потребления электроэнергии на собственные нужды энергоблока. Стоимость котла-утилизатора при этом снижена более чем на два миллиона рублей.

7. На основании результатов исследования показана вариативность применения технологии ступенчатого подогрева конденсата на примере энергоблоков различной мощности.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:**

*Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук:*

1. Хуторненко, С. Н. Котлы-утилизаторы, предназначенные для работы в составе энергоблоков ПГУ [Текст] / С. Н. Хуторненко, И. Д. Фурсов, Г. П. Пронь // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 117-122.
2. Хуторненко, С. Н. Математическое моделирование котла-утилизатора, предназначенного для работы в составе энергоблока ПГУ-230 [Текст] / С. Н. Хуторненко, И. Д. Фурсов, Г. П. Пронь // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 190-193.
3. Хуторненко, С. Н. Исследование режимов работы газового подогревателя конденсата с применением альтернативной схемы включения поверхностей нагрева [Текст] / С. Н. Хуторненко, И. Д. Фурсов, Г. П. Пронь // Вестник алтайской науки. – 2014. – № 4. – С. 346-349.
4. Хуторненко, С. Н. Разработка альтернативной схемы включения поверхностей нагрева газового подогревателя конденсата для котла-утилизатора [Текст] / С. Н. Хуторненко, И. Д. Фурсов, Г. П. Пронь // Вестник алтайской науки. – 2014. – № 4. – С. 350-352.

*Отраслевые издания и материалы конференций*

5. Хуторненко, С. Н. Опыт реконструкции паровых котлов Барнаульского котельного завода с повышением производительности и обеспечением технико-экономических и экологических показателей [Текст] / В. Г. Петухов, А. С. Городилов, С. Н. Хуторненко // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы : сборник докладов V научно-практической конференции : в 3-х т. Т. III. – Челябинск, 2011. – С. 31-40.

6. Хуторненко, С. Н. Котлы-утилизаторы, предназначенные для работы в составе энергоблоков ПГУ [Текст] / С. Н. Хуторненко, И. Д. Фурсов, Г. П. Пронь // Научное творчество студентов и сотрудников факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта : сборник тезисов и докладов : 72-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 69-78.
7. Хуторненко, С. Н. Разработка схемы включения поверхностей нагрева газового подогревателя конденсата для котла-утилизатора с исключением линии рециркуляции конденсата [Текст] / С. Н. Хуторненко // Наука. Технологии. Инновации : сборник научных трудов : в 9 ч. / под ред. О. В. Боруш. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 4. – С. 151-153.
8. Хуторненко, С. Н. Выявление основных групп факторов, которые влияют на повышение эффективности энергоблоков ПГУ посредством снижения затрат электроэнергии на собственные нужды для обеспечения работы котла-утилизатора [Текст] / С. Н. Хуторненко, И. Д. Фурсов, Е. Б. Жуков // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность : сборник докладов XXI всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Томск : Скан, 2015. –Т.1. – С. 240-243.

Подписано в печать 22.03.2017. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ 2017 – 66

Отпечатано в типографии АлтГТУ,

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.