На правах рукописи

Цибульский Святослав Анатольевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность:

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

Автореферат

диссертации на соискание степени кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	**Галашов Николай Никитович** кандидат технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	**Богомолов Александр Романович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Институт энергетики, заведующий кафедрой теплоэнергетики, г. Кемерово.
	Ларин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент, Саратовский государственный технический университет (СГТУ имени Гагарина Ю.А.), профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика», г. Саратов.
Ведущая организация:	Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), г. Москва.

Защита кандидатской диссертации состоится «27» 12.2018 г. в «09 ^{30}» часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «НИ ТПУ» или на сайте http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist

Автореферат разослан __ ________ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13 к.т.н., доцент Матвеев А. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Снижение температуры отвода теплоты в цикле является одним из основных способов увеличения КПД и мощности теплоэнергетических установок.

При работе парогазовой установки (ПГУ) в условиях пониженных среднегодовых температур окружающей среды в отдаленных северных районах прохождения нефтегазовых магистралей появляется возможность более эффективной работы за счет применения циклов на трех рабочих телах, в которой нижний цикл работает на органическом рабочем теле (ОРТ), а его конденсация происходит в воздушном конденсаторе. Это позволяет отводить теплоту в нижнем цикле предложенной ПГУ при более низкой температуре, чем при работе цикла на воде.

Объект исследования – утилизационная ПГУ с циклами на трех рабочих телах и конденсацией ОРТ в воздушном конденсаторе (ВК).

Целью работы является совершенствование тепловой схемы утилизационной ПГУ с циклами на трех рабочих телах для повышения КПД и мощности.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Обзор исследований по применению и совершенствованию ПГУ, ВК и ОРТ на ТЭС для выбора наиболее достоверных методик их расчета.

2. Выбор органического рабочего тела для работы в нижнем цикле утилизационной ПГУ при условии конденсации его в ВК.

3. Разработка методик расчета и параметрические исследования ПГУ, ВК и их комплекса.

   3.1. Разработка методики расчета и параметрические исследования тепловой схемы утилизационной ПГУ с циклами на трех рабочих телах.

   3.2. Разработка методики расчета ВК и исследование на ней эффективности конденсации разных видов ОРТ в широком диапазоне температур и скорости охлаждающего воздуха.

3.3. Разработка методики расчета и параметрические исследования комплекса ПГУ-ВК.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

1. Впервые выведено уравнение взаимосвязи КПД ПГУ с циклами на трех рабочих телах от КПД циклов и КПД связывающих эти циклы элементов.

2. Разработаны оригинальные методики расчета двух тепловых схем утилизационной ПГУ с циклами на трех рабочих телах, отличающиеся способом подогрева конденсата ОРТ перед экономайзером низкого давления – рециркуляцией конденсата и регенеративным подогревом конденсата в смешивающем подогревателе. Показано, что регенеративный подогрев конденсата в смешивающем подогревателе более эффективен.

3. С учетом последних исследований по теплообмену в оребренном трубном пучке разработана методика расчета ВК для исследования конденсации в нем разных видов органических рабочих тел.

4. Впервые разработана методика расчета комплекса ПГУ-ВК, которая позволила провести параметрические исследования с изменением режимных параметров ВК и циклов ПТУ, а также определить наиболее эффективное ОРТ.

На защиту выносятся:

– методика расчета и результаты исследований тепловой схемы ПГУ с циклами на трех рабочих телах и конденсацией ОРТ в ВК;

– методика расчета и результаты параметрических исследований ВК при конденсации в нем различных рабочих веществ;

– методика расчета и результаты параметрических исследований комплекса ПГУ–ВК с циклами на трех рабочих телах.

Теоретическая и практическая значимость

1. Выведено аналитическое уравнение связи КПД ПГУ с КПД отдельных циклов и связывающих циклы установок.

2. Программный продукт, реализующий методику расчета воздушного конденсатора, предназначен для проектирования промышленных воздушно-конденсационных установок и может использоваться учебными, научными,

промышленными и проектными организациями (свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2015615530).

3. Методика и программа расчета тепловой схемы ПГУ на базе трех рабочих тел, позволяющая проводить исследования при изменении параметров рабочих тел в среднем и нижнем циклах ПГУ.

4. Методика и программа расчета системы ПГУ-ВК, позволяющая проводить комплексные исследования изменения характеристик ВК и ПГУ в зависимости от режимных параметров теплоносителей и окружающего воздуха.

5. Получено заключение о практическом использовани результатов работы на АО «Дальневосточная генерирующая компания» филиала «Приморская генерация».

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- их непротиворечивостью с существующими базовыми физическими законами и уравнениями термодинамики, с представлениями о процессах в ПГУ, которые описываются в работе основными уравнениями материальных и тепловых балансов, тепло- и массопередачи в элементах ВК, котле-утилизаторе (КУ), турбинах, испарителе ОРТ и прочих теплообменных аппаратах;

- использованием для получения основных параметров устройств апробированных и хорошо зарекомендовавших методик расчета газотурбинной и паротурбинной установки, которая работает на водяном паре и ОРТ;

- использованием параметров при расчете теплоотдачи в воздушном конденсаторе проверенных критериальных уравнений;

- оценкой погрешности расчетов с использованием теории приближенных вычислений и случайной вариации исходных параметров.

Личный вклад автора заключается:

– в анализе существующих принципиальных схем ПГУ, формулировании подхода к их совершенствованию для условий пониженных температур окружающей среды путем введения в тепловую схему третьего цикла на органическом рабочем теле (ОРТ) с использованием воздушного конденсатора (ВК), в выборе методик определения основных параметров ПГУ и ВК, разработке на их основе объединенной методики расчета комплекса ПГУ-ВК и реализация данных методик в виде программ расчета на ЭВМ;

– в верификации созданных программ расчета и использовании их для проведения параметрических исследований по определение диапазонов параметров циклов рабочих тел, охлаждающего воздуха, которые отвечают условиям получения наибольшего электрического КПД установки;

– в обработке, анализе, обсуждении полученных результатов и выработке рекомендаций для практического использования на практике.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях ТПУ с 2014 по 2017 гг., на Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность», Томск, 2014; Региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, 2014; Международном молодёжном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томск 2016, 2017; Международной молодежной научной конференции «Будущее науки», Курск, 2014; Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 2017. На международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», Томск, 2017. Получено свидетельство Российской Федерации № 2015615530 от 03 апреля 2015 года о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет секции воздушного конденсатора». Получено заключение о практическом использовании результатов диссертационной работы на АО «Дальневосточная генерирующая компания» филиала «Приморская генерация».

Публикации

Основные положения, результаты и выводы диссертационных исследований опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 4 – в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Известия ТПУ» и «Электрические станции»; 13 публикаций в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus»: MATEC Web of Conferences, EPJ Web of Conferences, Power Technology and Engineering.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Данная работа изложена на 120 страницах, диссертация содержит 40 рисунков, 20 таблиц, список использованных источников, который включает 191 наименование, 29 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность диссертации, сформулированы цели и задачи, отражается теоретическая и практическая значимость, и научная новизна полученных результатов.

В первой главе диссертационной работы приведен аналитический обзор основных теоретических и экспериментальных работ по исследованию и совершенствованию ПГУ, анализу свойств рабочих веществ для цикла Ренкина, по особенностям конструкции и способам повышения теплообмена в ВК, анализ определения расчетных погрешностей.

Проанализировано состояние теоретических основ и условий повышения КПД ПГУ и газотурбинных установок (ГТУ): возможности повышения начальных и снижения конечных параметров рабочего вещества, снижения температуры воздуха на входе в компрессор, разработок по применению новых жаропрочных материалов, степени совершенствования теплообменного оборудования, введения дополнительных контуров в КУ, технологии утилизации низкопотенциального тепла, оптимизация тепловых схем, компоновочные решения оборудования, повышение мобильности установок, применение альтернативных видов топлива. Выделены четыре группы органических рабочих тел, проанализированы и составлены требования к свойствам рабочих веществ. Проведен анализ проблем использования ВК на ТЭС при работе на воде и ОРТ. Выбрана методика определения коэффициента теплоотдачи от стенки оребренных труб к охлаждающему воздуху, позволяющая повысить точность расчета теплообмена в

ВК. Проведенный анализ позволил определить пути совершенствования ПГУ и ВК с целью повышения эффективности их работы.

Во второй главе разработаны и сформулированы: методика расчета утилизационной ПГУ с циклами на трех рабочих телах, методика расчета ВК при конденсации в нем различных рабочих веществ, методика расчета комплекса ПГУ-ВК.

Произведен теоретический анализ по обоснованию тепловой эффективности ПГУ с циклами на трех рабочих телах. Выведено уравнение, позволяющее оценить КПД такой ПГУ и определить пути ее совершенствования:

$$\eta_{ПГУ} = \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ})\cdot\eta_{КУ}\cdot[\eta_{ПТУ} + (1 - \eta_{ПТУ})\cdot\eta_{ИОРТ}\,\eta_{ОРТ}], \qquad (1)$$

где $\eta_{ПГУ}$ – КПД ПГУ, $\eta_{ГТУ}$ – КПД ГТУ, $\eta_{КУ}$ – КПД КУ, $\eta_{ПТУ}$ – КПД паротурбинной установки (ПТУ) на водяном паре, $\eta_{ИОРТ}$ – КПД испарителя ОРТ ($И_{ОРТ}$), $\eta_{ОРТ}$ – КПД ПТУ на ОРТ.

Для полного использования теплоты уходящих газов в КУ были разработаны две тепловые схемы ПГУ, отличающиеся способом подогрева конденсата ОРТ перед КУ, которые представлены на рисунке 1.

Разработаны методика расчетов двух вариантов схемы ПГУ с циклами на трех рабочих телах: с рециркуляцией ОРТ перед КУ и с регенеративным подогревом (рисунок 1). Основные уравнения приведены в (2)-(8).

Определяются: состав газов на входе в ГТ и параметры газов по тракту КУ:

$$c_{П.С.} = f\{N_2;\%;\ Ar;\%;\ O_2;\%;\ H_2O;\%;\ CO_2;\%\}, \qquad (2а)$$

$$I_{ВХ}^{КУ} = f(c_{П.С.};\ \theta_{ГТУ}^{ВХ\_КУ};\ p_{П.С.}),\ кДж/кг, \qquad (2б)$$

где $\theta_{ГТУ}^{ВХ\_КУ}$ – температура газов на выходе из ГТУ, °С, $p_{П.С}$ – давление газов за ГТУ, МПа.

Электрическая мощность ЦВД и расхода водяного пара:

$$N_Э^{ЦВД} = D_0^{ЦВД}\cdot H_i^{ЦВД}\cdot\eta_{ЭМ}\cdot 10^{-3},\ МВт, \qquad (3а)$$

$$D_0^{ЦВД} = G_Г\cdot(I_{ВХ}^{КУ} - I_И)/(h_{0П} - (h'_В)^И),\ кг/с, \qquad (3б)$$

где $G_Г$ – расход газов за ГТУ, кг/с, $I_И$ – энтальпия газов перед испарителем, кДж/кг, $h_{0П}$ – энтальпия водяного пара на выходе из КУ, кДж/кг, $(h'_В)^И$ – энтальпия воды перед испарителем, кДж/кг.

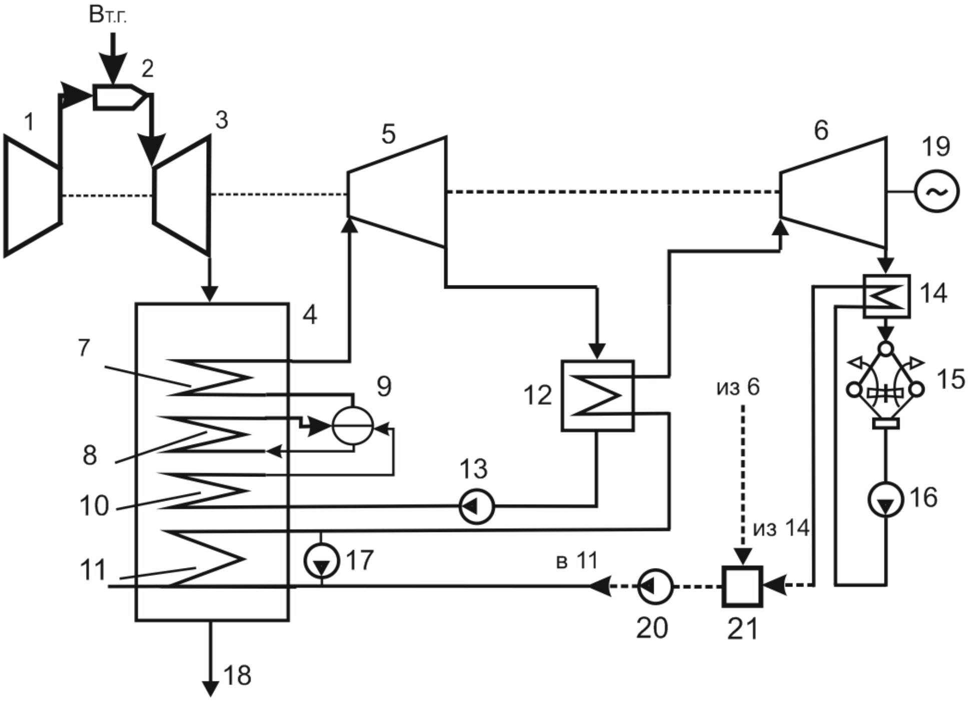


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема ПГУ с циклами на трех рабочих телах: 1 – компрессор ГТУ, 2 – камера сгорания (КС), 3 – газовая турбина (ГТ), 4 – двухконтурный КУ, 5 –ЦВД, 6 – ЦНД, 7 – пароперегреватель (ПП) высокого давления, 8 – испаритель высокого давления, 9 – барабан высокого давления, 10 – экономайзер высокого давления , 11 – экономайзер низкого давления, 12 – испаритель ОРТ ($И_{ОРТ}$), 13 – конденсатный насос высокого давления, 14 – охладитель пара, 15 – ВК, 16 – конденсатный насос низкого давления, 17 – насос рециркуляции ОРТ, 18 – отвод уходящих газов, 19 – электрогенератор, 20 – питательный насос ОРТ, 21 – регенеративный подогреватель ОРТ

Тепловой баланс для охладителя пара:

$$D_0^{ЦНД}\cdot((h_k^{ПТ})^{ОРТ} - h_{ОП}^{ОРТ})\cdot\eta_П = D_0^{ЦНД}\cdot((h_{ВЫХ}^{ОП})^{ОРТ} - h_{ПН2}), \quad (4)$$

где $(h_k^{ПТ})^{ОРТ}$ – энтальпия пара ОРТ после ЦНД, кДж/кг, $h_{ОП}^{ОРТ}$ – энтальпия пара ОРТ после охладителя пара, кДж/кг, $h_{ВЫХ}^{ОП})^{ОРТ}$ – энтальпия конденсата ОРТ после нагрева в ОП, $h_{ПН2}$ – энтальпия ОРТ после питательного насоса, кДж/кг, $D_0^{ЦНД}$ – расход пара ОРТ на ЦНД.

Тепло, передаваемое водяным паром в испарителе ОРТ:

$$Q_{ИОРТ} = D_0^{ЦВД}\cdot((h_К^{ЦВД} - (h'_{ВП})^{ИОРТ})\cdot\eta_{ИОРТ}/10^3, МВт, \quad (5)$$

где $h_К^{ЦВД}$ – энтальпия водяного пара после ЦВД, кДж/кг, $(h'_{ВП})^{ИОРТ}$ – энтальпия водяного конденсата за $И_{ОРТ}$, кДж/кг, $\eta_{ИОРТ}$ – КПД $И_{ОРТ}$.

Тепловой расчет регенеративной системы подогрева ОРТ перед КУ:

$$D_1 \cdot h_1 - (D_0^{ЦНД} - D_1)\,(h_{ВЫХ}^{ОП})^{ОРТ} = D_0^{ЦНД} \cdot h_{ВХ}^{Эк2}, \quad (6)$$

где h_1 – энтальпия пара ОРТ в отборе на регенеративный подогрев, кДж/кг, D_1 – расход ОРТ на регенеративный подогрев, кг/с, $h_{ВХ}^{Эк2}$ – энтальпия ОРТ на входе в экономайзер низкого давления КУ, кДж/кг.

Система уравнений для системы рециркуляции для подогрева конденсата перед КУ состоит из: уравнения теплового баланса для испарителя ОРТ, уравнение теплового баланса для системы рециркуляции конденсата ОРТ, уравнение теплового баланса для экономайзера низкого давления:

$$D_0^{ЦНД} = Q_{ИОРТ}/((h^{//ОРТ})^{ИОРТ} - h_{ВЫХ}^{Эк2}),\ кг/с, \quad (7а)$$

$$D_Р = D_0^{ЦНД} \cdot (h_{ВХ}^{Эк2} - (h_{ВЫХ}^{ОП})^{ОРТ})/(h_{ВЫХ}^{ЭК2} - h_{ВХ}^{ЭК2})\ ,\ кг/с, \quad (7б)$$

$$h_{ВЫХ}^{Эк2} = h_{ВХ}^{Эк2} + Q_{ЭК2}/D_{ЭК2},\ кДж/кг. \quad (7в)$$

где $Q_{ИОРТ}$ – тепловая нагрузка на $И_{ОРТ}$, кВт, $(h^{//ОРТ})^{ИОРТ} = h_0^{ОРТ}$, $h_{ВЫХ}^{Эк2}$ – энтальпия ОРТ на выходе из экономайзера низкого давления, кДж/кг, $Q_{ЭК2}$ – тепловая нагрузка на экономайзер низкого давления, кВт, $D_{ЭК2}$ – суммарный расход ОРТ на экономайзер низкого давления.

Электрический КПД ПГУ брутто:

$$\eta_Э^{ПГУ} = N_Э^{ПГУ} \cdot 100/Q_{КС},\ \%. \quad (8)$$

Методика расчета ВК позволяет определить расход конденсируемого вещества, коэффициент теплопередачи и гидравлическое сопротивление секции ВК, необходимое число секций для заданного расхода ОРТ, а также мощность и число вентиляторов заданного типоразмера. В качестве исходных данных задаются: геометрические параметры секции и труб; режимные параметры теплоносителя; режимные параметры воздуха; принимаемые параметры и коэффициенты; материалы, форма труб и ребер.

Число Нуссельта для охлаждающего воздуха:

$$Nu_2 = 1{,}13 \cdot C_Z \cdot C_q \cdot Re_2^m \cdot Pr_{ОПР}^{0{,}33}, \quad (9)$$

где C_Z – коэффициент учитывающий количество поперечных потоку воздуха рядов труб, C_q – коэффициент, учитывающий сжатие потока воздуха, погрешность определения (16) составляет ≤ 10 % и справедлива для $Re=5\cdot10^3$ – $2\cdot10^5$ при ψ=1,2 – 39,0, σ_1 = 1,7 – 6,5, σ_2 = 1,3 – 9,5.

Среднеповерхностный конвективный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = Nu_2\cdot\lambda_{ОПР}/d_Г,\ Вт/м^2\cdot K. \quad (10)$$

где $\lambda_{ОПР}$ – коэффициент теплопроводности охлаждающего воздуха, Вт/м·K, $d_Г$ – гидравлический диаметр, м. Границы применимости уравнения (10): D/d=1,1÷4,0; βh=0,1÷4,0.

Критерий Нуссельта в зависимости от полноты конденсации:

$$Nu_{ОРТ} = C_{Nu}\cdot Re^{0,8}\cdot Pr^{0,43}\cdot 0,5\left[\sqrt{1+\left(1-x_{ВЫХ}\right)\cdot\left(\frac{\rho_{КН}}{\rho_П}-1\right)}+\sqrt{1+x_{ВЫХ}\cdot\left(\frac{\rho_{КН}}{\rho_П}-1\right)}\right], \quad (11)$$

где C_{Nu} – коэффициент, зависящий от материала труб, погрешность определения составляет ≤ 5-10 % и справедлива при $Re>5\cdot10^3$, Pr>1, 0<x<1.

Коэффициент теплоотдачи теплоноситель-стенка:

$$\alpha_1 = Nu_{ОРТ}\cdot\lambda_{КН}/d_1,\ Вт/м^2\cdot K. \quad (12)$$

Аэродинамическое сопротивление пучка труб:

$$\Delta p_2 = z\cdot Eu\cdot\rho_2\cdot\omega_2^{\,2}\cdot10^{-3},\ кПа, \quad (13)$$

где ρ_2 – плотность воздуха, кг/м^3, ω_2 – скорость воздуха, м/с, Eu – критерий Эйлера.

Анализ взаимосвязанной системы ПГУ-ВК позволяет в комплексе исследовать ее работу и оценить влияние режимных параметров на характеристики совместной работы ВК и ПГУ. В основе методики расчета ПГУ – ВК лежат рассмотренные выше методики расчета ВК и ПГУ, которые объедены в единую систему.

В третьей главе на основе методики расчета разработана программа расчета схем ПГУ. С помощью программы для ПГУ на базе ГТУ GE 9HA.02 проведены исследования зависимости КПД ПГУ брутто и нетто и мощности от начального P_0 и конечного $P_{2К}$ давления ЦВД и температуры конденсации ОРТ. В качестве топлива для ГТУ выбран природный газ. ГТУ GE 9HA.02 имеет электрическую мощность $N_Э^{ГТУ}$ = 557 МВт, температуру на входе ГТ $\theta_{ГТУ}^{ВХ}$ = 1600 °C и на выходе $\theta_{ГТУ}^{ВЫХ}$ = 645 °C. Для паротурбинного цикла, работающего на водяном паре, исходные данные: давление на входе ЦВД P_0 = 18 МПа и на выходе $P_{2К}$ = 0,2 МПа. Для паротурбинного цикла, работающего на R365mfc, исходные данные: температура конденсации $t_К$ = 15 °C; температура ОРТ на входе в экономайзер низкого давления $t_{ВХ}^{Эк2}$ = 60 °C; температура продуктов сгорания на выходе КУ $\theta_{УХ}$ = 100 °C. Результаты исследований приведены на рис. 2–4, где ПГУ с РП – ПГУ с регенеративным подогревом, ПГУ с РЦ – ПГУ с рециркуляцией.

На рисунке 2 приведены зависимости КПД (а) и электрической мощности ПГУ (б) от начального давления пара на входе ЦВД P_0, при давлении на выходе ЦВД $P_{2К}$ = 0,2 МПа.

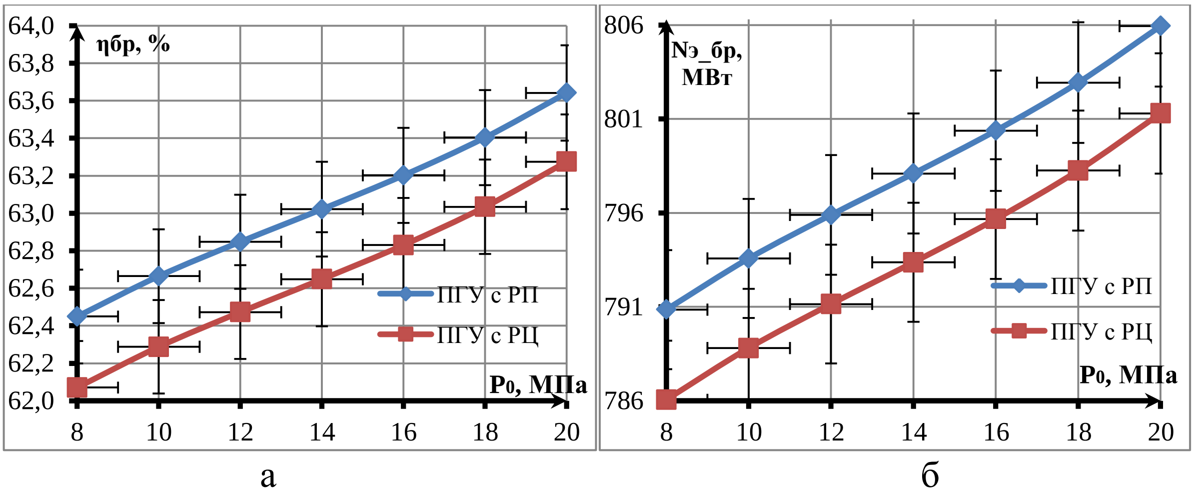
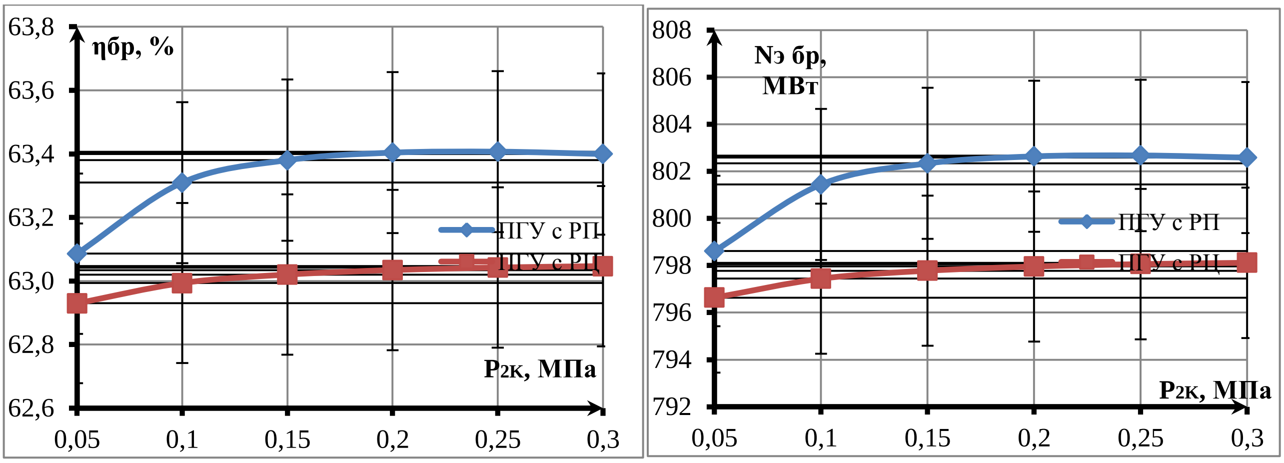


Рисунок 2 – Зависимость КПД брутто и электрической мощности брутто ПГУ от начального давления водяного пара

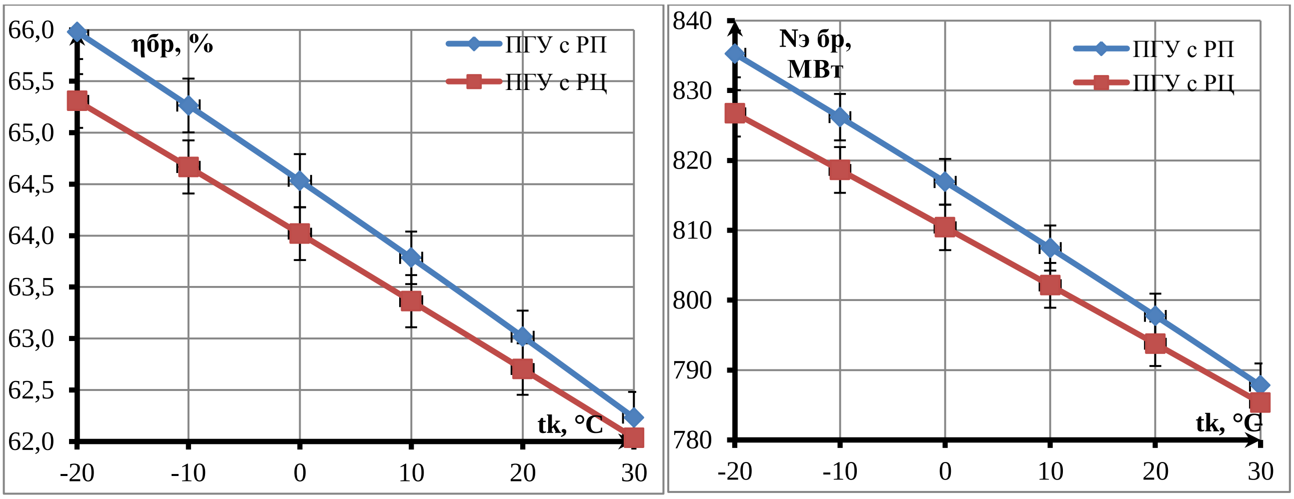
На рисунке 3 приведены зависимости КПД (а) и электрической мощности ПГУ (б) от давления водяного пара на выходе из ЦВД $P_{2К}$ при начальном давлении пара перед ЦВД 18 МПа.



а б

Рисунок 3 – Зависимость КПД брутто и электрической мощности брутто ПГУ от давления водяного пара $P_{2К}$

На рисунке 4 приведены зависимости КПД (а) и электрической мощности ПГУ (б) от температуры конденсации R365mfc в ВК, при начальном давлении водяного пара в ЦВД P_0 = 18 МПа и давлении водяного пара на выходе из ЦВД $P_{2К}$ = 0,2 МПа.



а б

Рисунок 4 – Зависимость КПД брутто (а) и электрической мощности брутто ПГУ (б) от температуры конденсации $t_К$

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. КПД и электрическая мощность ПГУ с циклом, реализующим регенеративный подогрев ОРТ перед КУ по всем диапазонам исследуемых параметров выше, чем у ПГУ с циклом ОРТ с рециркуляцией при всех прочих равных условиях. Данный эффект для ПГУ с регенеративным подогревателем объясняется достижением большей выработкой тепла в экономайзере низкого

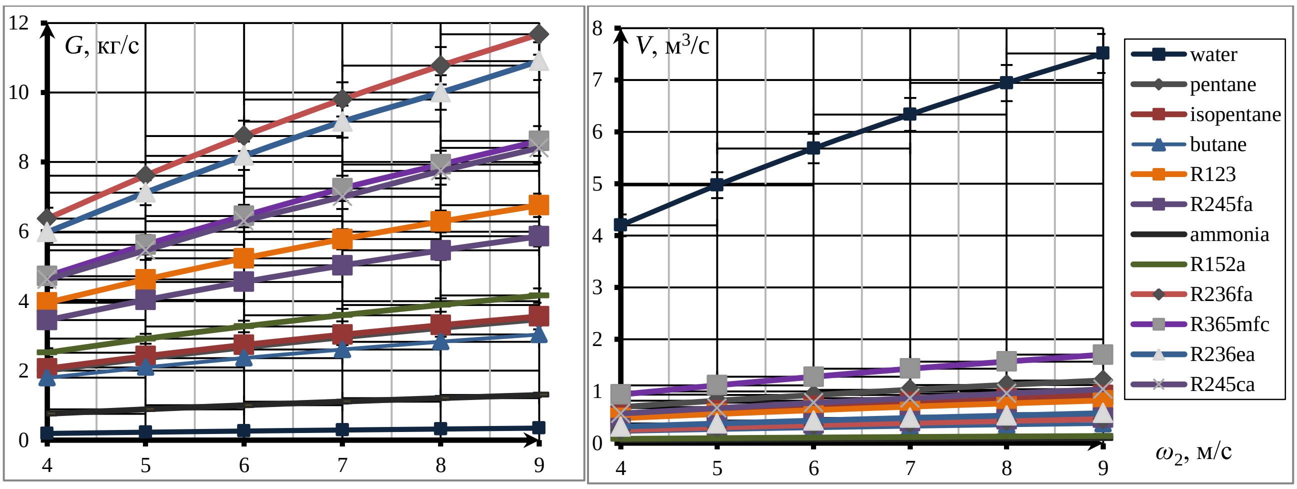
давления и расхода ОРТ на ЦНД паровой турбины и отсутствием затрат электроэнергии на привод насосов рециркуляции. КПД ПГУ с регенеративным подогревом конденсата ОРТ перед КУ при оптимальных значениях параметров водяного пара и ОРТ на 0,41 % выше, чем у ПГУ с рециркуляцией ОРТ.

2. Оптимальный диапазон давления пара на выходе ЦВД: 0,2–0,25 МПа.

3. Температура конденсации ОРТ оказывает значительное влияние на КПД и мощность ПГУ с тремя циклами. В схеме ПГУ с регенеративным подогревом ОРТ в зимнее время года можно достичь КПД брутто 66 %, КПД нетто 65,3%. В летнее время КПД нетто составляет 62÷63.5 %.

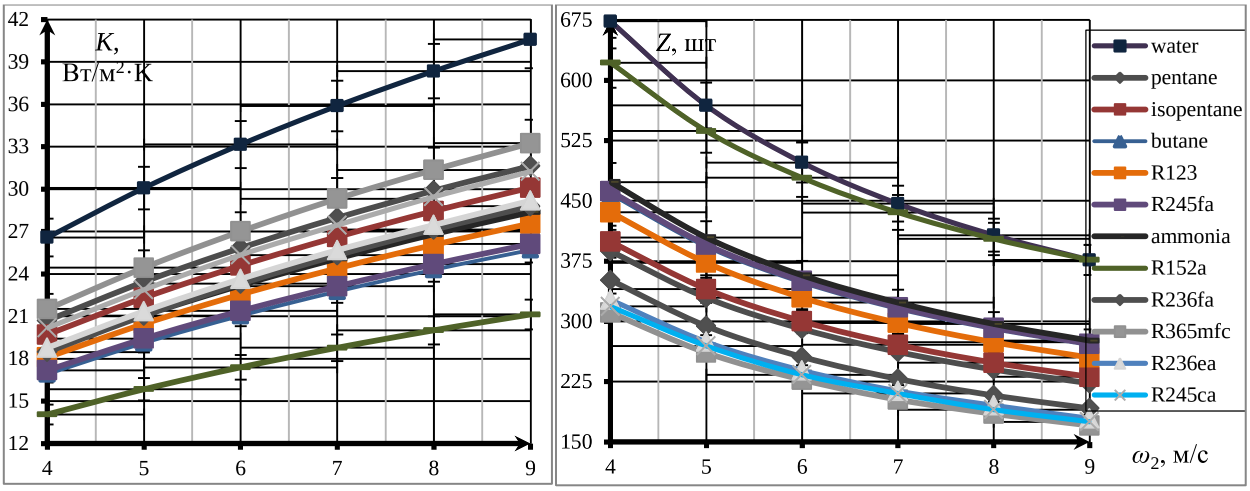
4. При давлении водяного пара на входе ЦВД 18 МПа и давлении на выходе ЦВД 0,2 МПа, при работе нижнего цикла на R365mfc и температуре конденсации от 0 до +20 °С КПД нетто ПГУ с циклами на трех рабочих телах составляет от 61,74 % до 63,26 %. В то время как для ПГУ с ГТУ 9HA.02 с трехконтурным КУ и ПП максимальный КПД нетто составляет 61,8 %.

В четвертой главе с помощью методики расчета ВК проведены исследования процесса конденсации ряда ОРТ в секции ВК в зависимости от скорости воздуха в трубном пучке и температуры охлаждающего воздуха на входе в конденсатор. На рисунках 5–7 приведены зависимости массовых и объемных расходов рабочих веществ, коэффициента теплопередачи и числа секций и аэродинамического сопротивления пучка труб от скорости охлаждающего воздуха.



а б

Рисунок 5 – Зависимость изменения массового *G* (а) и объемного *V* (б) расхода теплоносителей на одну секцию от скорости охлаждающего воздуха ω_2



а б

Рисунок 6 – Зависимость коэффициента теплопередачи *K* (а) и количества секций *Z* (б) ВК от скорости охлаждающего воздуха ω_2

Увеличение скорости воздуха приводит к линейному росту массового и объемного расхода конденсируемого ОРТ. Число секций при заданном расходе пара в конденсатор с ростом скорости воздуха гиперболически снижается.

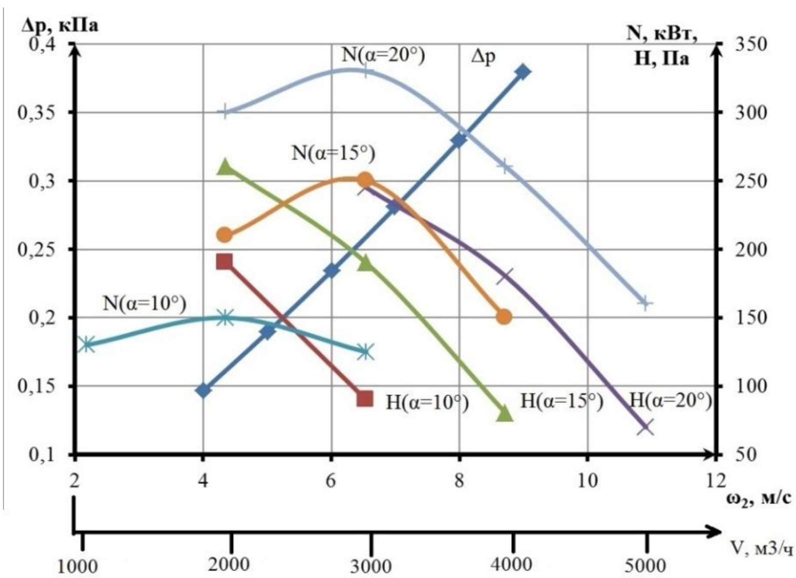
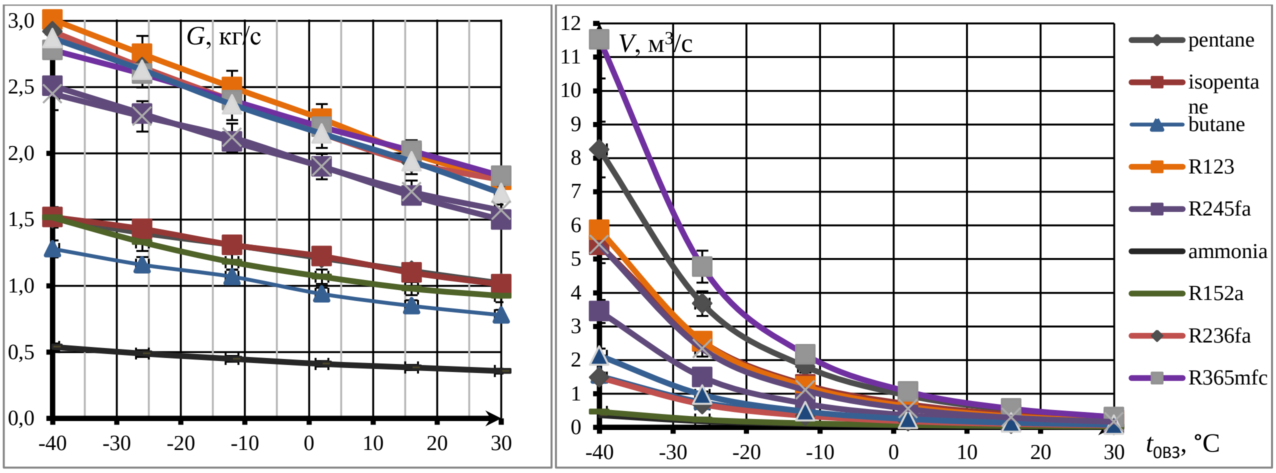


Рисунок 7 – Зависимость аэродинамического сопротивления секций ВК и характеристик вентилятора ВГ-104 от скорости ω_2 (подачи *V*) охлаждающего воздуха при температуре 15 °С

На рис. 7 видим, что оптимальный режим работы вентилятора ВГ-104 находится в диапазоне скорости охлаждающего воздуха 6÷8 м/с и подачи

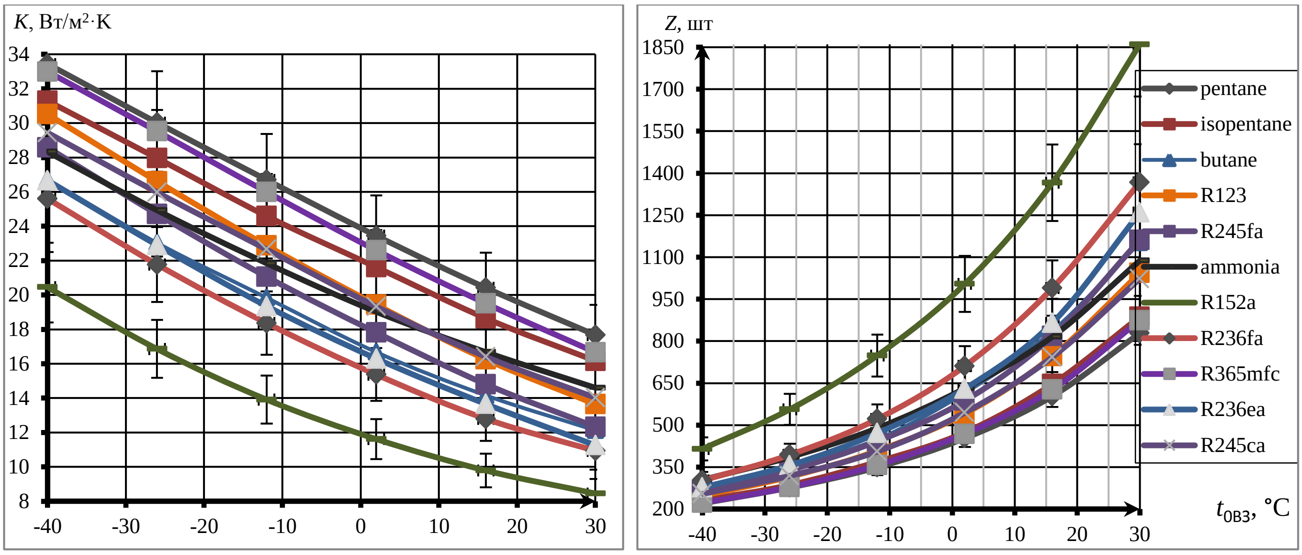
0,75÷1,00 м^3/с. Оптимум мощности и наибольший КПД $\eta_В$ = 78 % достигается при углах поворота лопаток 15° и 20°.

На рисунке 8 приведены зависимости массовых и объемных расходов теплоносителей, на рисунке 9 – зависимость коэффициента теплопередачи ВК и числа секций ВК от температуры охлаждающего воздуха и от ОРТ.



а б

Рисунок 8 – Зависимость массового *G* (а) и объемного *V* (б) расхода теплоносителей на одну секцию от температуры охлаждающего воздуха $t_{0В3}$

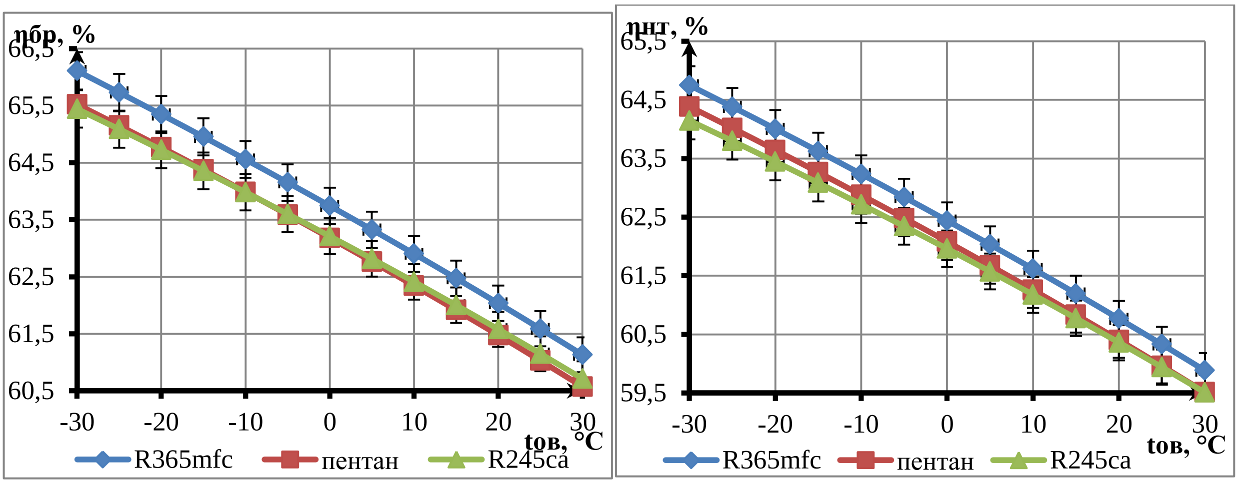


а б

Рисунок 9 – Зависимость коэффициента теплопередачи *K* (а) и количества секций *Z* (б) ВК от температуры охлаждающего воздуха $t_{0В3}$ при конденсации ОРТ

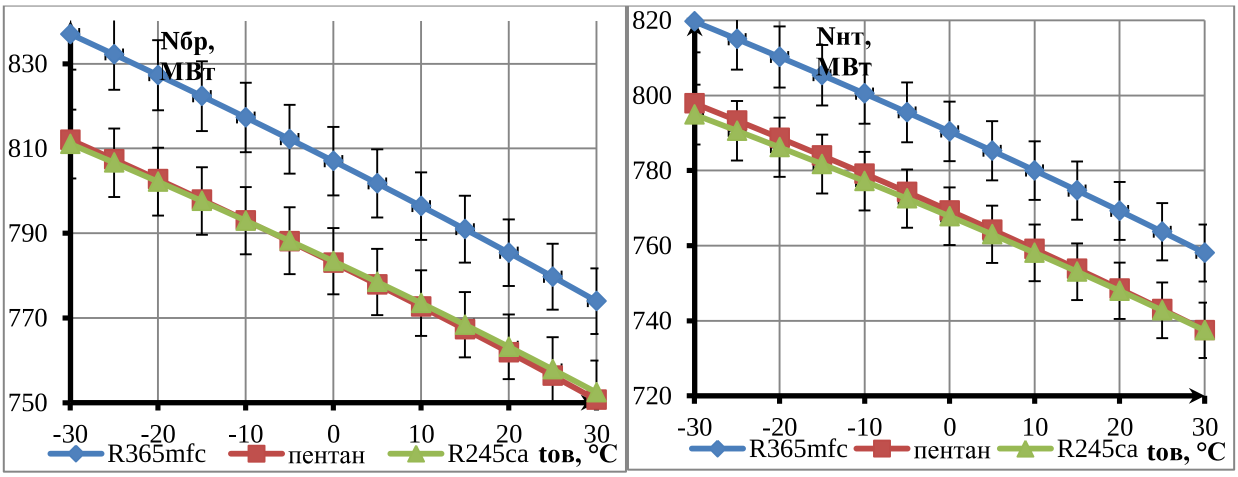
Вид ОРТ сильно влияет на показатели тепловой эффективности секции ВК. Наилучшие показатели получены для пентана и R365mfc. Снижение температуры приводит к линейному росту массового расхода ОРТ и сильному параболическому росту его объемного расхода, что вызывает рост скорости ОРТ в трубах. Снижение температуры воздуха значительно увеличивает коэффициент теплопередачи, что ведет к сокращению числа секций в конденсаторе.

В пятой главе на основе методики расчета системы ПГУ–ВК составлена программа, по которой проведены расчеты и получены зависимости КПД и мощности ПГУ, электрической мощности ЦНД от температуры охлаждающего воздуха. Проведено сравнение КПД, мощности и выработки электроэнергии для ПГУ с циклами на трех рабочих телах и стандартной ПГУ с трехконтурным КУ и промперегревом. В результате расчетов определены три наиболее эффективных ОРТ: R365mfc, R245ca и пентан. Результаты параметрических исследований представлены на рисунках 10–11.



а б

Рисунок 10 – Зависимость абсолютного электрического КПД брутто (а) и нетто (б) ПГУ от температуры охлаждающего воздуха $t_{ОВ}$

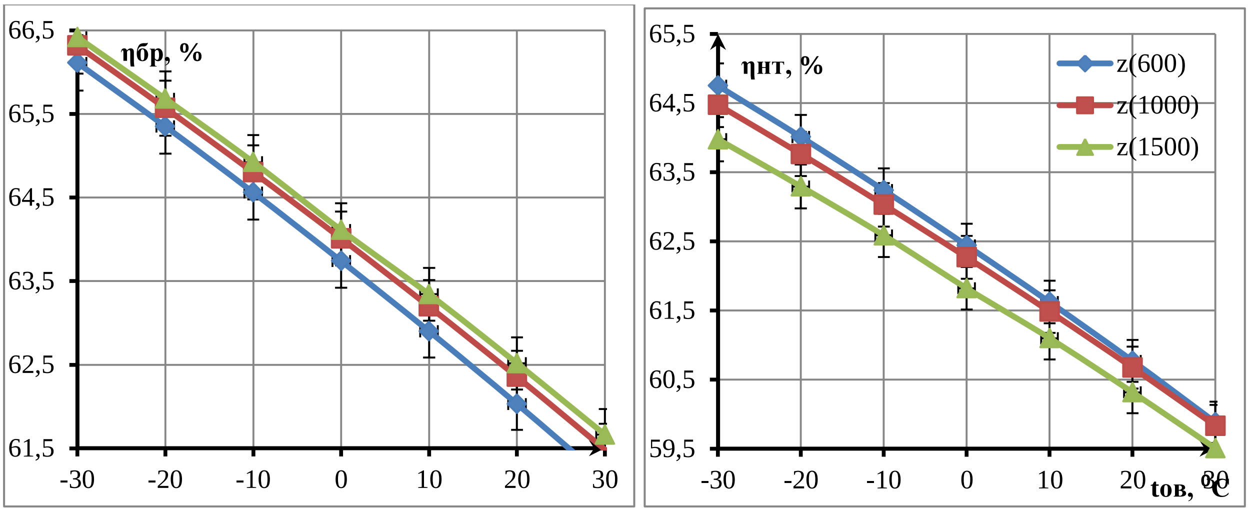


а б

Рисунок 11 – Зависимость электрической мощности ПГУ брутто (а) и нетто (б) от температуры охлаждающего воздуха $t_{ОВ}$

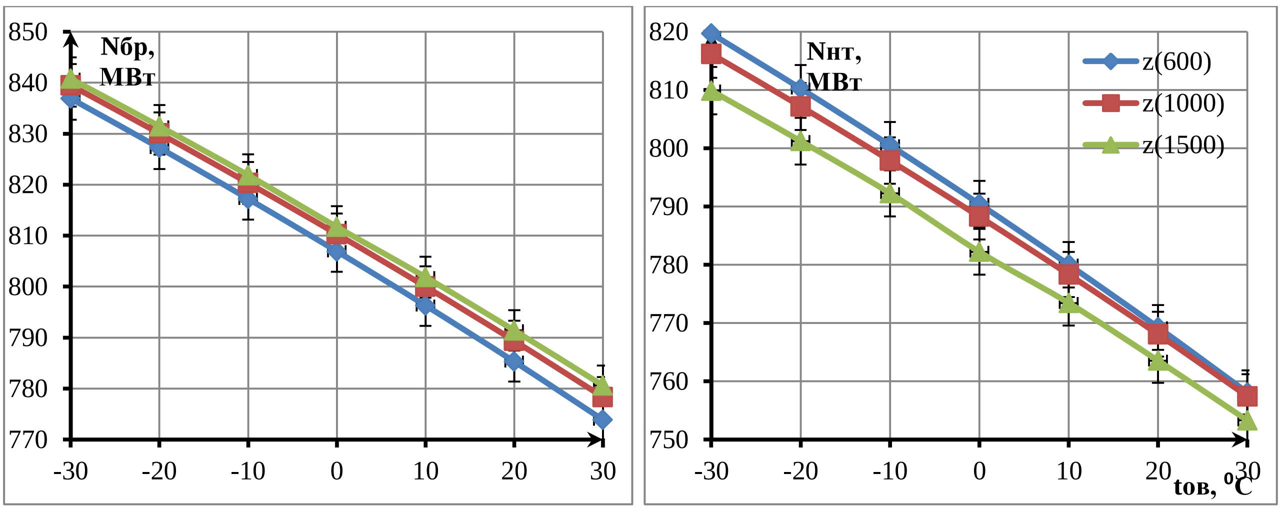
КПД и мощность ПГУ с ростом температуры охлаждающего воздуха практически линейно падает. Это объясняется тем, что при снижении температуры охлаждающего воздуха давление конденсации ОРТ падает, что приводит к росту теплоперепада ЦНД турбины.

Для оценки влияния числа секций ВК на КПД и мощность ПГУ были проведены параметрические исследования, результаты которых приведены на рисунках 12-13. Расчеты проводились при работе нижнего цикла ПГУ на фреоне R365mfc. Для исследований были выбраны ВК с количеством секций *Z* 600, 1000 и 1500.



а б

Рисунок 12 – Зависимость КПД ПГУ брутто (а) и нетто (б) от температуры охлаждающего воздуха с ВК при различных *Z*



а б

Рисунок 13 – Зависимость электрической мощности ПГУ брутто (а) и нетто (б) от температуры охлаждающего воздуха

Увеличение числа секций ВК приводит к росту КПД ПГУ брутто и мощности ПГУ брутто из-за снижения температуры конденсации фреона и увеличения теплоперепада в ЦНД турбины, но при этом увеличение числа вентиляторов в ВК ведет к увеличению затрат мощности на собственные нужды ПГУ и снижению ее КПД нетто и мощности нетто.

Температура охлаждающего воздуха сильно влияет на КПД и электрическую мощность ПГУ с циклами на трех рабочих телах с конденсацией ОРТ в ВК. В России, где температура воздуха большое время года имеет отрицательные значения, создание и эксплуатация ПГУ с ВК является актуальной задачей.

Для оценки тепловой экономичности предложенной ПГУ по сравнению со стандартной ПГУ с трехконтурным КУ и промперегревом проведены расчеты КПД, мощности и выработки электроэнергии по среднемесячным температурам для климатических условий города Сургут. Для сравнения выбрана наиболее совершенная стандартная ПГУ, разработанная фирмой General Electric на основе ГТУ GE 9HA.02. Расчеты проведены при условии работы ГТУ в номинальном режиме с постоянной температурой воздуха на входе в компрессор.

На рисунках 14 и 15 представлены график изменения электрической мощности и диаграмма выработки электроэнергии для ПГУ с циклами на трех рабочих телах и стандартной трехконтурной ПГУ по месяцам года для климатических условий города Сургут.

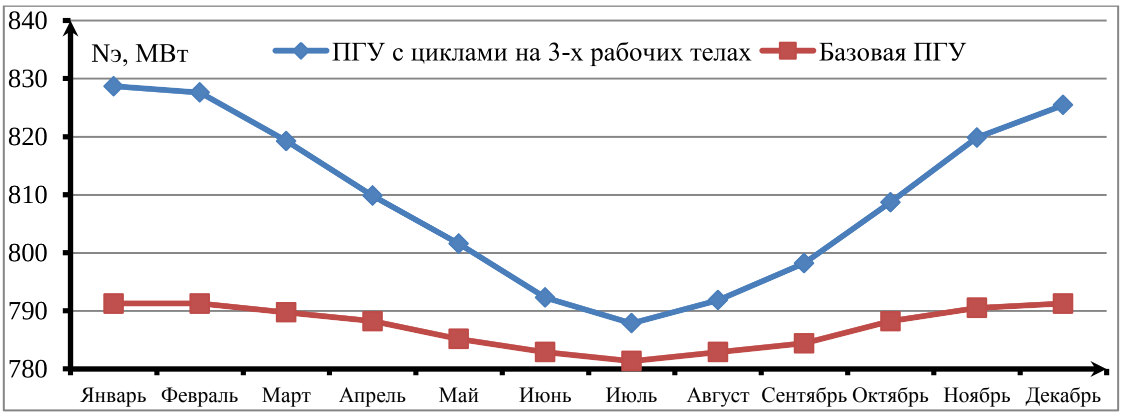


Рисунок 14 – График изменения электрической мощности ПГУ с циклами на трех рабочих телах и стандартной трехконтурной ПГУ по месяцам для г. Сургут

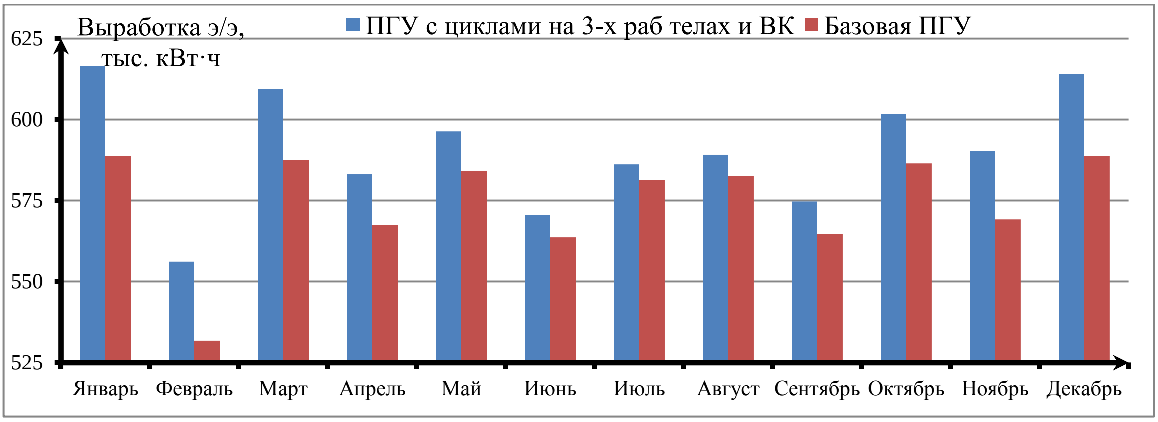


Рисунок 15 – Выработка электроэнергии по месяцам для предлагаемой ПГУ и стандартной ПГУ для г. Сургут

Среднемесячная электрическая мощность ПГУ с ВК выше, чем у стандартной ПГУ. Это объясняется более низкой температурой отвода тепла в цикле в холодные месяцы на ПГУ с циклами на трех рабочих телах относительно стандартной трехконтурной ПГУ за счет применения цикла на ОРТ и ВК.

Суммарная выработка электроэнергии для ПГУ с циклами на трех рабочих телах за год составила 7088,2 млн кВт·ч, для ПГУ с трехконтурным КУ и промперегревом – 6896,2 млн кВт·ч. При этом на предлагаемой ПГУ увеличение годовой выработки электроэнергии относительно стандартной составляет 191,9 млн кВт·ч.

На рисунке 16 приведен график зависимости электрического КПД брутто для ПГУ с ВК и для стандартной ПГУ от среднемесячной температуры для климатических условий г. Сургут.

КПД ПГУ с ВК выше, чем у стандартной трехконтурной ПГУ за счет более низких температур конденсации рабочего тела. С января по июль КПД брутто ПГУ с циклами на трех рабочих телах снижается с 65,46 % до 62,24 %, объясняется это повышением среднемесячной температуры воздуха с -21,3 до +18,6 °С, при этом температура конденсации ОРТ в воздушном конденсаторе изменяется от -12,73 до 29,94 °С. Снижение КПД брутто стандартной трехконтурной ПГУ менее заметно: с 62,51 % до 61,72 %, т.к. температура охлаждающей воды за этот период увеличивается с 5 до 12 °С. КПД предлагаемой ПГУ выше стандартной трехконтурной ПГУ за счет применения в ней цикла на органическом рабочем теле, который более эффективно использует низкопотенциальное тепло.

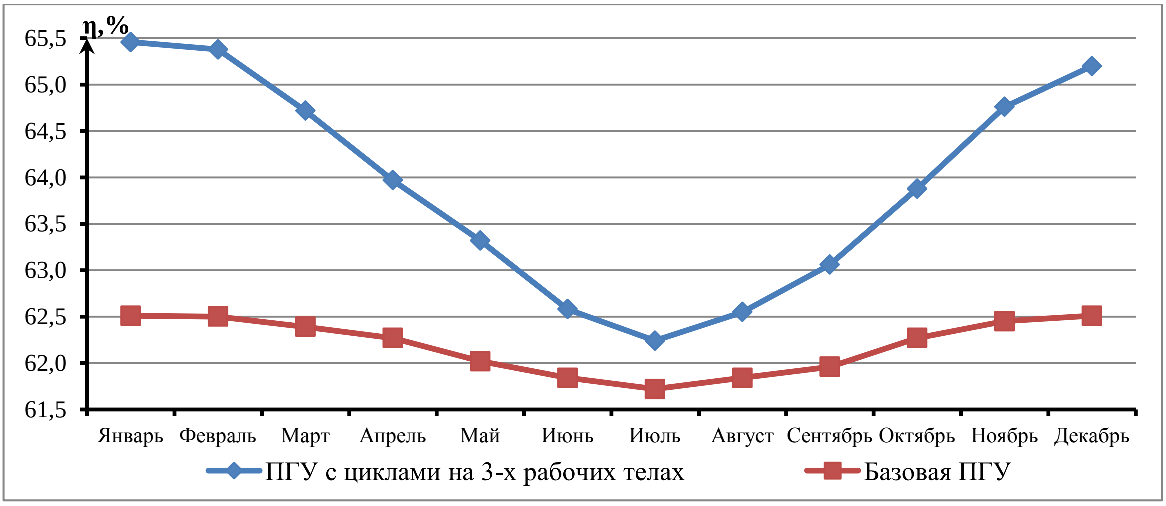


Рисунок 16 – Электрический КПД брутто для ПГУ с циклами на трех рабочих телах и ВК и стандартной трехконтурной ПГУ для г. Сургут

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Снижение температуры охлаждающего воздуха пропорционально увеличивает КПД и мощность ПГУ. Наилучшие показатели получены при работе нижнего цикла на фреоне R365mfc. При изменении температуры охлаждающего воздуха от 30 до –30 °С КПД брутто изменяется от 61,1 до 66,1 %, а КПД нетто от 60 до 64,8 %. Откуда следует, что при температурах охлаждающего воздуха ниже 10 °С исследуемая ПГУ будет иметь КПД нетто выше, чем трехконтурная ПГУ на базе ГТУ GE 9HA.02.

2. Работа нижнего цикла на R365mfc позволяет повысить КПД нетто на 0,4 % по сравнению с работой на пентане и на 0,5 % по сравнению с работой на R245ca.

3. Работа нижнего цикла на R365mfc позволяет иметь электрическую мощность ПГУ нетто на 20 МВт выше по сравнению с работой на пентане и R245ca во всем диапазоне температур охлаждающего воздуха.

4. При изменении температуры охлаждающего воздуха от 30 до –30 °С электрическая мощность ПГУ нетто при работе на R365mfc возрастает с 758 до 820 МВт, а мощность ЦНД с 58 до 121 МВт.

5. Показано, что выбор оптимального числа секций в ВК возможен только на основе технико-экономического анализа, т.к. увеличение числа секций ведет к росту КПД и мощности ПГУ брутто и падению КПД и мощности ПГУ нетто.

6. Показано, что годовая выработка электроэнергии на ПГУ с циклами на трех рабочих телах с ВК выше, чем на стандартной ПГУ фирмы General Electric на 191,9 млн кВт·ч.

В заключении приведены основные итоги диссертационной работы.

1. Проведен обзор современных научных исследований по применению и совершенствованию ПГУ, ВК и ОРТ на ТЭС для выбора наиболее достоверных методик их расчета.

2. Проанализированы свойства ОРТ для определения возможности их работы в нижнем цикле утилизационной ПГУ при условии конденсации в ВК.

3. Разработана тепловая схема ПГУ с циклами на трех рабочих телах в двух модификациях: с подогревом ОРТ перед экономайзером КУ: рециркуляцией конденсата и подогревом в регенеративном подогревателе. Представлено теоретическое обоснование тепловой эффективности ПГУ с циклами на трех ОРТ. Получено уравнение, отражающее влияние КПД отдельных циклов и элементов, связывающих данные циклы на КПД ПГУ. Разработана методика расчета тепловой схемы ПГУ с циклами на трех рабочих телах, на основе которой написаны методика и программа расчета схемы ПГУ. Параметрические исследования показали, что схема ПГУ с регенеративным подогревом конденсата ОРТ перед экономайзером низкого давления КУ имеет КПД нетто на 0,41 % выше, чем схема с рециркуляцией. Определено, что наилучшим рабочим телом для нижнего цикла является фреон R365mfc. Исследовалось влияние начального давления водяного пара для КУ в диапазоне от 8 до 20 МПа на КПД ПГУ для двух вариантов подогрева конденсата ОРТ перед КУ: с регенеративным смешивающим подогревателем и рециркуляцией. Для ПГУ с регенеративным подогревом конденсата ОРТ во всем диапазоне исследуемых начальных давлений КПД нетто составляет от 61,39 % при 8 МПа до 62,32 % при начальном давлении 20 МПа, при этом электрическая мощность нетто изменяется от 777 МВт до 789 МВт. Для

дальнейших исследований были приняты три начальных давления 6, 12, 18 МПа. Оптимальным диапазоном давления водяного пара на выходе из ЦВД является 0,15-0,30 МПа. При снижении давления конденсации водяного пара в испарителе ОРТ ниже 0,10 МПа КПД нетто ПГУ снижается с 62,1 % до 61,9 %. Это связано со снижением температуры подвода тепла в нижнем цикле ОРТ. При давлении конденсации водяного пара в испарителе ОРТ 0,2 МПа достигаются наибольшие значения КПД нетто 62,1 % и электрической мощности ПГУ 786,5 МВт. Температура конденсации ОРТ в ВК оказывает большее влияние на эффективность, чем начальное и конечное давление водяного пара. В интервале температур конденсации в конденсаторе ОРТ от -20 до +30 °С КПД нетто падает от 63,61 % до 60,75 %. При начальном давлении водяного пара 18 МПа, давлении конденсации в испарителе ОРТ 0,2 МПа, при работе нижнего цикла на фреоне R365mfc и температуре конденсации от 0 до +20 °С КПД нетто ПГУ с циклами на трех рабочих телах составляет от 61,74 % до 63,26 %. В то время как для ПГУ с ГТУ 9HA.02 с трехконтурным КУ и ПП максимальный КПД нетто составляет 61,8 %.

4. Разработана методика расчета ВК для условий конденсации в нем разных видов ОРТ. Параметрические исследования показали, что выбор вида ОРТ, скорости и температуры охлаждающего воздуха при проектировании ВК существенно влияют на его капитальные затраты и технико-экономические показатели. Выявлено, что пентан, R245ca и R365mfc обладают наилучшими термодинамическими и термо-физическими параметрами при условии конденсации в воздушном конденсаторе при изменении режимных параметров.

5. Разработана методика комплексного расчета системы ПГУ-ВК с циклами на трех рабочих телах и конденсацией ОРТ в ВК с регенеративным подогревом ОРТ перед КУ. Проведенные исследования для системы ПГУ–ВК при изменении температуры охлаждающего воздуха показали, что снижение температуры охлаждающего воздуха пропорционально увеличивает КПД и мощность ПГУ. Наилучшие показатели получены при работе нижнего цикла на фреоне R365mfc. При изменении температуры охлаждающего воздуха от +30 до -30 °С КПД брутто

изменяется от 61,1 до 66,1 %, а КПД нетто от 60 до 64,8 %. Откуда следует, что при температурах охлаждающего воздуха ниже 10 °С исследуемая ПГУ будет иметь КПД нетто выше, чем ПГУ с трехконтурным КУ и промежуточным перегревом пара на базе ГТУ GE 9HA.02. Работа нижнего цикла на R365mfc позволяет повысить КПД нетто на 0,4 % по сравнению с работой на пентане и на 0,5 % по сравнению с работой на R245ca. Работа нижнего цикла на R365mfc позволяет иметь электрическую мощность ПГУ нетто на 20 МВт выше по сравнению с работой на пентане и R245ca во всем диапазоне температур охлаждающего воздуха. При изменении температуры охлаждающего воздуха от 30 до -30 °С электрическая мощность ПГУ нетто при работе на R365mfc возрастает с 758 до 820 МВт, а мощность ЦНД с 58 до 121 МВт. Показано, что на ПГУ с ВК годовая выработка электроэнергии выше, чем на ПГУ с трехконтурным КУ и промежуточным перегревом. Годовая выработка электроэнергии в климатической зоне г. Сургут на ПГУ-ВК составляет 7088,2 млн кВт·ч против 6896,2 млн кВт·ч, и составляет 191,9 млн кВт·ч. Данный результат показывает эффективность использования схемы установки с тремя циклами, в которой нижний цикл работает на ОРТ, а его конденсация происходит в ВК.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1. **Цибульский С.А.** Анализ влияния основных параметров паротурбинного цикла на эффективность тринарных парогазовых установок / Н. Н. Галашов, С. А. Цибульский // Известия Томского политехнического университета, Томский политехнический университет (ТПУ). – 2013. –Т. 323, № 4: Энергетика. – с. 14-21.

2. **Цибульский С.А.** Анализ эффективности парогазовых установок тринарного типа / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Известия Томского политехнического университета, Томский политехнический университет (ТПУ). – 2014. – Т. 325, № 4: Техника и технологии в энергетике. – с. 33-38.

3. **Цибульский С.А.** Тепловая эффективность утилизационных ПГУ тройного цикла / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2014. – №10(999). – с. 11–15.

4. **Цибульский С.А.** Численное исследование характеристик конденсации различных теплоносителей в охлаждаемом воздухом аппарате / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2015. – №8(1009). – с. 24-31.

публикации в материалах баз данных SCOPUS и Web of Science:

5. **Tsibulskii S.A.** Thermal Efficiency of Three-Cycle Utilization-Type Steam-Gas Units / N.N. Galashov, S.A. Tsibulskii // Power Technology and Engineering: Scientific Journal. – 2015. – Vol. 48, iss. 6. – p. 459-463.
6. **Tsibulskii S.A.** Numerical study of the characteristics of the air condenser section / N.N. Galashov, S.A. Tsibulskiy // MATEC Web of Conferences. – 2015. – vol. 37. – iss. 01021.– p.1-6.
7. **Tsibul'ski S.A.** Numerical Analysis of the Condensation Characteristics of Different Heat-Transfer Media in an Air-Cooled Condenser / N.N. Galashov, S.A. Tsibul'ski // Power Technology and Engineering. – 2016. – 49(5). – c. 365-370.
8. **Tsibulskiy S.** Analysis of the properties of working substances for the organic Rankine cycle based database "REFPROP" / N. Galashov, S. Tsibulskiy, T. Serova // EPJ Web of Conferences. – 2016. – №110. – 01068.
9. **Tsibulskii S.** Numerical research of steam and gas plant efficiency of triple cycle for extreme north regions / N. Galashov, S. Tsibulskii, A. Matveev, V. Masjuk // EPJ Web of Conferences. – 2016. – №110. – 01019.
10. **Tsibulskiy S.** Application of Evaporative Cooling for the Condensation of Water Vapors from a Flue Gas Waste Heat Boilers CCP / N. Galashov, S. Tsibulskiy, A. Kiselev // MATEC Web of Conferences.–2016. – 72. – 01029.
11. **Tsibulskiy S.A.** Promising Direction of Perfection of the Utilization Combine Cycle Gas Turbine Units / A.I. Gabdullina, N.N. Galashov, S.A. Tsibulskiy, I.A. Asanov, A.S. Kiselev// MATEC Web of Conferences. – 2016. – 91. – 01004.
12. **Tsibulskiy S.** Research of efficiency of the organic Rankine cycle on a mathematical model / N. Galashov, S. Tsibulskiy, A. Gabdullina, D. Melnikov, A.S. Kiselev // MATEC Web of Conferences. – 2016. – 92. – 01070.
13. **Tsibulskiy S.** Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 110. – 01027.
14. **Tsibulskiy S.** Flue gas moisture capacity calculation at the outlet of the condensation heat recovery unit / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 110. – 01029.
15. **Tsibulskiy S.** Decision working medium for lower cycle CCGT trinary type / S. Tsibulskiy, N. Galashov, D. Melnikov, A. Kiselev, A.. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 141. – 01025.
16. **Tsibulskiy S.** Improvement air condensers evaluation model / S. Tsibulskiy, N. Galashov, D. Mel'nikov, A. Kiselev, A. Bannova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 194. – 01017.
17. **Tsibulskiy S.** Algorithm for calculation of a CCGT of a trinary type with an air condenser / S. Tsibulskiy, N. Galashov, D. Mel'nikov, A. Kiselev, A. Bannova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 194. – 01017.