

На правах рукописи



Лыков Алексей Викторович

**ВЫБОР И РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Забелин Николай Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Михайлов Владимир Евгеньевич,
генеральный директор ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук

Ширманов Владимир Михайлович,
технический директор ЗАО «РЭП Холдинг»,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация

ООО НТЦ «Микротурбинные технологии»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 23 » сентября 2014 г. в « 16⁰⁰ » часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФБ ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences.html> ФБ ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2014г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.229.06, к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время во всем мире отмечается тенденция к экономии топлива, повышению энергоэффективности и энергосбережению. Россия располагает крупнейшими в мире топливно — энергетическими ресурсами. На территории России сосредоточено около 25% всех энергоресурсов планеты: 45 % мировых запасов природного газа, 13 % нефти, 23 % угля и 14 % урана. По запасам природного газа и его добыче Россия занимает первое место в мире. В тоже время Россия располагает масштабным недоиспользуемым потенциалом энергосбережения, который по способности решать проблему обеспечения экономического роста страны сопоставим с приростом производства всех первичных энергетических ресурсов.

Распоряжением Правительства России №1715-р от 13.11.2009 г. принята «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.». В соответствии с этой стратегией одним из направлений развития газовой промышленности является развитие единой системы газоснабжения (ЕСГ) и ее расширение на восток России, усиление на этой основе интеграции регионов страны. При этом энергосбережение и энергоэффективность являются одними из важнейших направлений.

ЕСГ России является крупнейшей в мире газотранспортной сетью. В состав ЕСГ входят 161,7 тыс. км магистральных газопроводов и отводов, 215 линейных компрессорных станций с общей мощностью газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в 42 тыс. МВт, 6 комплексов по переработке газа и газового конденсата, 25 объектов подземного хранения газа.

На компрессорных станциях ЕСГ России эксплуатируется более 3200 ГПА с газотурбинным приводом. По количеству потребляемого топлива газовая промышленность в России занимает второе место после электроэнергетики.

В настоящее время возрастает значение сохранения и охраны окружающей природной среды. Особенно актуальным становится вопрос связанные с эмиссией загрязняющих веществ (ЗВ) и теплового загрязнения от газотранспортной системы. Также большое значение приобретают экологические характеристики ГТУ которые применяются для привода ГПА.

Обеспечение линейных компрессорных станций (КС) и других объектов ЕСГ электроэнергией на собственные нужды является одной из актуальных задач. Зачастую подвод линий электропередач к объектам ЕСГ является трудновыполнимым и дорогостоящим из-за их удаленности от крупных электростанций и единой электрической сети. Кроме того, бесперебойное снабжение КС электроэнергией от линий электропередач зависит от погодных условий, что снижает надежность выполнения КС основной задачи по транспортировке газа.

Одним из основных направлений энергосбережения на объектах ЕСГ России является утилизация тепла уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ) ГПА. Теплота уходящих газов ГТУ может быть использована в комбинированных газопаровых установках (ГПУ) для выработки электроэнергии. Полученная электроэнергия может использоваться на собственные нужды КС или другими находящимися по близости промышленными и гражданскими объектами. Таким образом решаются сразу две важные задачи: утилизация тепла уходящих газов ГТУ и обеспечение КС электроэнергией на собственные нужды.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является разработка научно-технических основ создания утилизационных паротурбинных установок (УПТУ) в составе ГПУ для обеспечения газоперекачивающих компрессорных станций ЕСГ России электроэнергией на собственные нужды с учетом снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ структуры парка ГПА ЕСГ России.
2. Оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов ГТУ ГПА ЕСГ России.
3. Определение мощности собственных нужд КС «Северная».
4. Выбор тепловой схемы и разработка методики расчета УПТУ в составе ГПУ.
5. Анализ существующих методик расчет ГПУ.
6. Выбор оптимальных режимных характеристик УПТУ в составе ГПУ.
7. Анализ возможности применения органических рабочих тел (ОРТ) в УПТУ.
8. Выбор тепловой схемы и разработка методики расчета УПТУ с ОРТ в составе ГПУ.
9. Оценка аэродинамического сопротивления котла-утилизатора ГПУ.
10. Исследование экологических характеристик и оценка эмиссии парниковых газов и ЗВ от ГТУ ГПА ЕСГ России.

Научная новизна работы

1. На основе исследования парка ГПА ЕСГ России обоснованно применение ГПУ для выработки электроэнергии на собственные нужды КС.
2. Разработана методика расчета ГПУ для выработки электроэнергии только лишь на собственных нужд КС.
3. Рассмотрены традиционная схема ГПУ с одноконтурным котлом-утилизатором (КУ) и схема ГПУ с органическими рабочими телами (ОРТ) в которых используется лишь часть уходящих газов ГТУ, необходимая для выработки электроэнергии только на собственные нужды КС.
4. Для компенсации аэродинамического сопротивления котла-утилизатора в рассматриваемых схемах ГПУ предусмотрен дымосос.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны научно-технические основы создания УПТУ в составе ГПУ для обеспечения ГКС электроэнергией на собственные нужды.
2. Исследована структура парка ГПА ЕСГ России.
3. Произведена оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов ГТУ ГПА ЕСГ России, которая может быть использована для выработки электроэнергии равная 87,9 ГВт.
4. Разработана методика расчета тепловой схемы ГПУ с ОРТ для выработки электроэнергии на собственные нужды ГКС.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались расчетно—экспериментальные методы исследования. Для проведения исследований были построены математические модели ГПУ с применением современных вычислительных систем.

Личный вклад автора состоит в разработке и обосновании научно-технических основ создания утилизационных паротурбинных установок для обеспечения газоперекачивающих компрессорных станций ЕСГ России электроэнергией собственных нужд.

Положения выносимые на защиту:

- результаты исследования парка ГПА ЕСГ России по: структуре, мощности ГТУ, расходу и температуре уходящих газов ГТУ;
- результаты проведенных оценок: располагаемой тепловой мощности уходящих газов ГТУ, мощностей выбросов NO_x , CO_2 , CO , CH_4 в зависимости от типа ГПА и их количества;
- обоснование тепловой схемы и параметров комбинированной ГПУ на базе ГТУ Taurus 60 для выработки электроэнергии собственных нужд КС «Северная» с одноконтурным КУ, а также тепловой схемы ГПУ с ОРТ.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях:

1. Международная - научно практическая конференция «XXXVIII неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 30 ноября — 05 декабря 2009 г.
2. «I Конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силловые машины» 25 — 26 ноября 2010 года.
3. Международная научно-практическая конференция «XXXIX Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 6—11 декабря 2010 г.
4. «II Конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силловые машины» 20—21 октября 2011 года,

5. «III Конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силовые машины» 31 октября—2 ноября 2012 года.
6. Международная научно-практическая конференция «XLI Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 3—8 декабря 2012 г.
7. «IV Конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силовые машины» 7—8 ноября 2013 года.
8. Научно-практическая конференция с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ», 2—7 декабря 2013 года.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ (из них 3 работы в журналах ВАК).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 229 страницах, диссертация содержит 74 рисунок, 34 таблицы, список использованных источников, включающий 90 наименований и 6 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель и задачи исследований. Приведена структура и содержание диссертационной работы.

В главе 1 рассмотрены классификация и источники вторичных топливно-энергетических ресурсов (ВЭР) на промышленных предприятиях и транспорте. Рассмотрены источники ВЭР на КС, к которым относятся: высокопотенциальная теплота уходящих газов ГТУ и ДВС; низкопотенциальная теплота охлаждающего воздуха после аппаратов воздушного охлаждения компримируемого газа; ВЭР избыточного давления транспортируемого по магистральному газопроводу газа. Выполнен обзор реализованных проектов по использованию ВЭР на промышленных предприятиях и на компрессорных станциях линейных газопроводов. Рассмотрены характеристики и конструкции современных паротурбинных установок малой мощности. Рассмотрены методики расчета комбинированных газопаровых установок.

В главе 2 проведен анализ парка ГПА ЕСГ России показавший количественное распределение ГПА по типу привода: 80% с газотурбинным приводом (3388 шт.), 16% с электрическим (701 шт.) и 4% с приводом от поршневых двигателей (163 шт.).

Построено распределения количества z ГТУ (рисунок 1) и распределение располагаемой тепловой мощности Q_T в зависимости от типа ГТУ (рисунок 2).

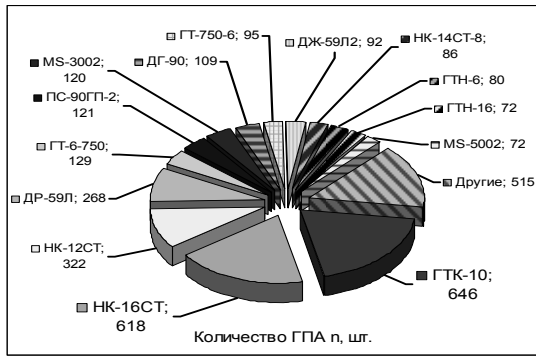


Рисунок 1. Распределение количества z ГТУ в зависимости от типа и количества ГТУ

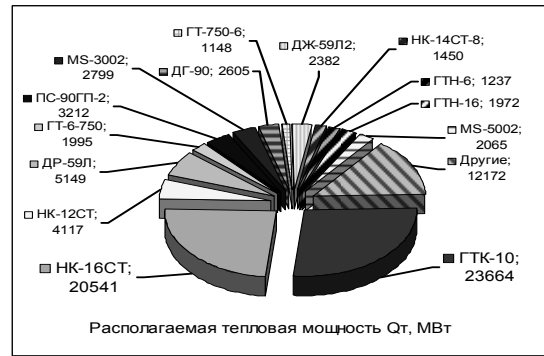


Рисунок 2. Располагаемая тепловая мощность в зависимости от типа ГТУ

Анализ распределения количества z ГТУ в зависимости от типа и количества ГТУ показал, что широкое использование для привода ГПА получили следующие ГТУ: ГТК-10 (646 шт.); НК-16СТ (618 шт.); НК-12СТ (322 шт.); ДР-59Л (268 шт.). Для ГПА с газотурбинным приводом используются в основном ГТУ отечественного производства. Суммарная величина располагаемой тепловой мощности уходящих газов всех рассмотренных ГТУ составила 87.9 ГВт.

Рассчитаны и построены распределения годовых мощностей выбросов NO_x , CO_2 , CO , CH_4 (рисунок 3) в зависимости от типа и количества ГТУ.

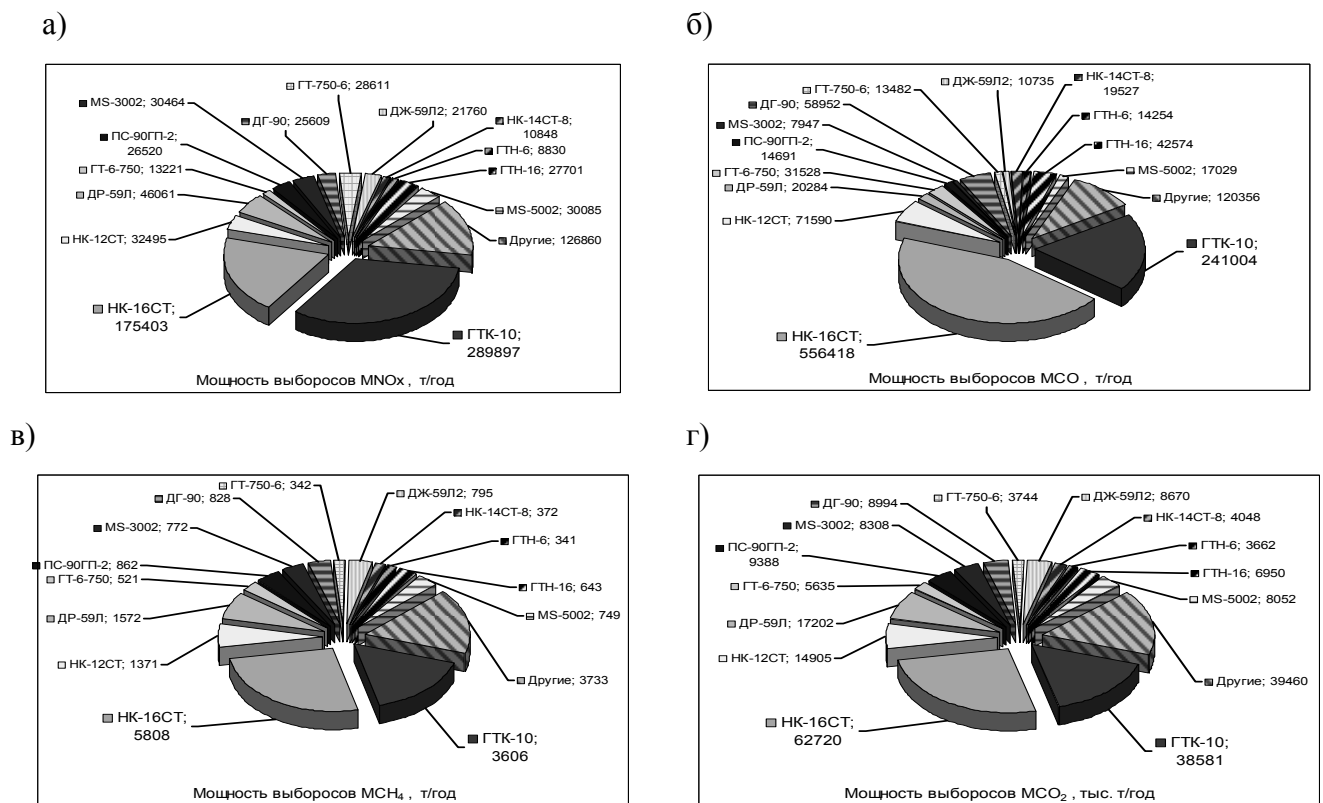


Рисунок 3. Распределения мощностей выбросов а) NO_x , б) CO , в) CH_4 , г) CO_2 , в зависимости от типа и количества ГТУ

Анализ распределения годовых мощности выбросов NO_x , CO_2 , CO , CH_4 показал, что наиболее значительные мощности выбросов исходят от следующих типов ГТУ:

- по NO_x от ГТК-10 (289897 т/год), НК-16СТ (175403 т/год), ДР-59 Л (46061 т/год), ГТН-25 (34986 т/год);
- по CO_2 от НК-16СТ (62720 тыс. т/год), ГТК-10 (38581 тыс. т/год), ДР-59 Л (17202 тыс. т/год), НК-12СТ (14905 тыс. т/год);
- по CO от НК-16СТ (556418 т/год), ГТК-10 (241004 т/год), НК-12СТ (71590 т/год), ДГ-90 Л (58952 т/год);
- по CH_4 от НК-16СТ (556418 т/год), ГТК-10 (241004 т/год), НК-12СТ (71590 т/год), ДР-59 Л (1572 т/год).

Полученное распределение объясняется количественным преобладанием в структуре парка ГПА и техническими характеристиками ГТК-10, НК-16СТ, НК-12СТ, ДР-59Л.

Проведен анализ изменения тарифов на электроэнергию в России за последние 15 лет, показавший их рост.

На основе анализа годового электропотребления КС «СЕВЕРНАЯ» определены денежные затраты на покупку электроэнергии (3 975 276 руб за 2012 год) и фактическая средняя потребленная электрическая энергия КС за 1 час: 308 кВт в зимний период (декабрь-февраль); 131 кВт в летний период (июнь-август); обоснована и выбрана мощность ПТ в составе ГПУ равная 500 кВт.

В главе 3 представлено описание тепловой схемы, технические характеристики и цикл в t,s -диаграмме ГТУ Taurus 60 s. Приведен подробный порядок расчета тепловой схемы ГТУ по методике СПбГПУ. С помощью программ GTP, разработанной на кафедре “Турбины, гидромашин и авиационные двигатели”, определены параметры рабочего процесса в характерных сечениях проточной части ГТУ при использовании стандартного углеводородного топлива. Расчеты производились при постоянной номинальной эффективной мощности ГТУ ($N_e = 5200 \text{ кВт}$) и постоянной температуре продуктов сгорания перед компрессорной турбиной ($T_3 = 1258 \text{ К}$) в зависимости от степени повышения давления в компрессоре Π_k и температуры окружающей среды t_a .

По результатам расчетов построены зависимости: удельной полезной работы $N_e = f(\Pi_k, t_a)$, эффективного КПД $\eta_e = f(\Pi_k, t_a)$ и коэффициента полезной работы ГТУ $\varphi = f(\Pi_k, t_a)$ представленные на рисунке 4, а также зависимости расхода $G_r = f(\Pi_k, t_a)$ и температуры $t_4 = f(\Pi_k, t_a)$ уходящих газов представленные на рисунке 5.

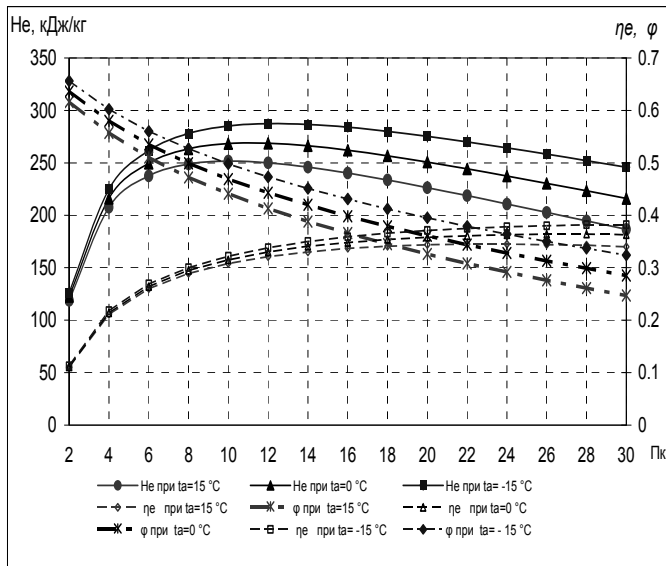


Рисунок 4. График зависимостей $H_e=f(\Pi_k, t_a)$, $\eta_e=f(\Pi_k, t_a)$ $\varphi=f(\Pi_k, t_a)$

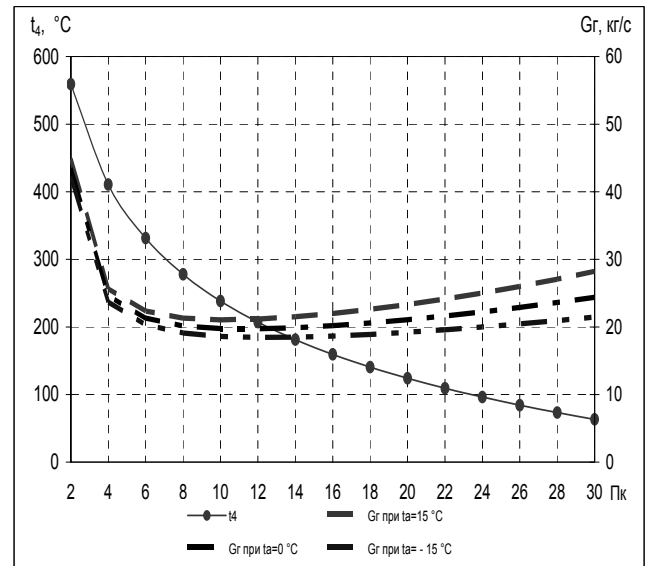


Рисунок 5. График зависимостей $G_r = f(\Pi_k, t_a)$, $t_4 = f(\Pi_k, t_a)$

Определены необходимые для проведения исследований основные параметры ГТУ в зависимости от температуры окружающей среды t_a (таблица 1).

Таблица 1

| Параметр ГТУ | $t_a=15\text{ }^\circ\text{C}$ | $t_a=0\text{ }^\circ\text{C}$ | $t_a=-15\text{ }^\circ\text{C}$ |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| H_e , кДж/кг | 250 | 269 | 287 |
| η_e | 0.318 | 0.326 | 0.334 |
| φ | 0.420 | 0.450 | 0.479 |
| t_4 , $^\circ\text{C}$ | 488 | 488 | 488 |
| G_r , кг/с | 21.1 | 19.7 | 18.5 |

Сопоставление полученных результатов по температуре уходящих газов с заявленными характеристиками ГТУ и с результатами замеров температуры уходящих газов ГТУ, проведенными ИТИ ОАО «Газпром», показало незначительное их расхождение (2%), что свидетельствует о правильности и высокой точности проведенных расчетов.

В главе 4 рассмотрена тепловая схема ГПУ с одноконтурным КУ и пароводяным рабочим телом. Тепловая схема такой ГПУ проста в эксплуатации и характеризуется низкими удельными вложениями. Предполагается направлять в КУ лишь часть уходящих газов ГТУ, обеспечивающая выработку в ПТ требуемой мощности. Тепловая схема ГПУ представлена на рисунок 6.

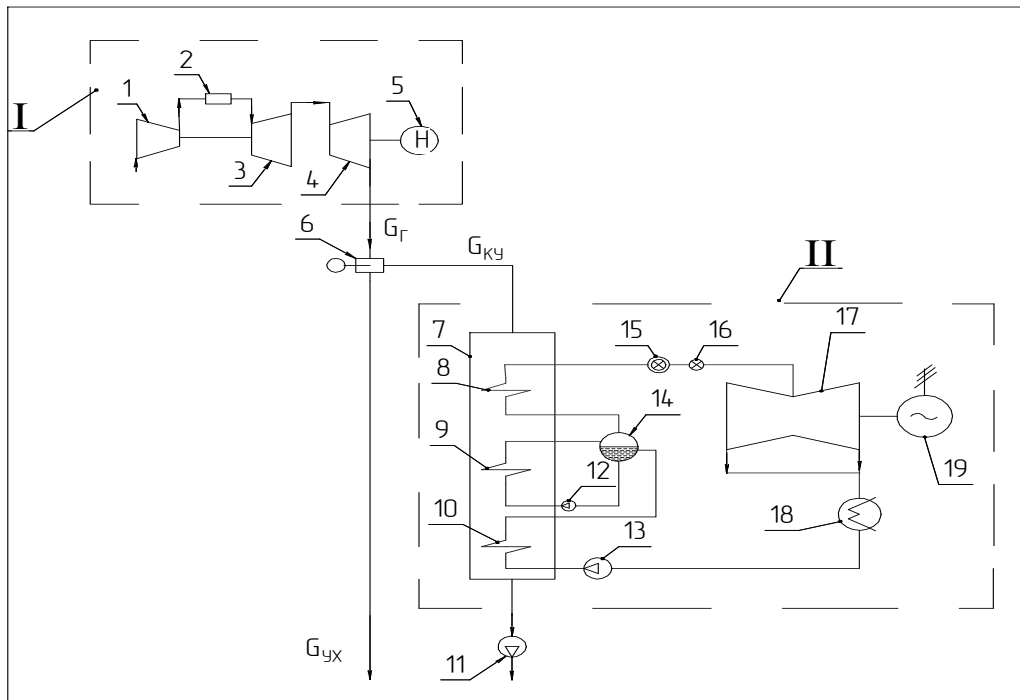


Рисунок 6. Тепловая схема ГПУ с одноконтурным КУ: I-газовый контур; II-паровой контур; 1-компрессор; 2-камера сгорания; 3- компрессорная турбина; 4-силовая турбина; 5-нагнетатель; 6- шиберная заслонка; 7- котел-утилизатор; 8-пароперегреватель; 9-испаритель; 10-экономайзер; 11-дымосос; 12-циркуляционный насос; 13-питательный насос (ПН); 14-барабан; 15-стопорный клапан; 16-регулирующий клапан; 17-ПТ; 18-конденсатор; 19-электрогенератор

Составлена математическая модель ГПУ. Подробно рассмотрена методика расчета тепловой схемы ГПУ. Исследовано влияние изменения температуры окружающей среды на показатели ГПУ (рисунок 7).

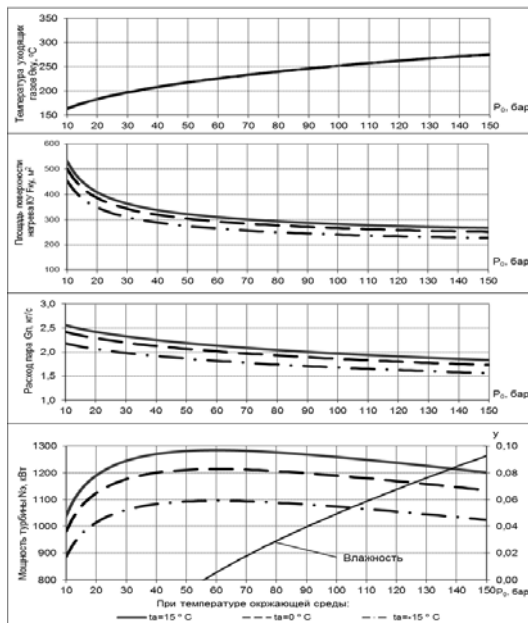


Рисунок 7. Изменение основных параметров ГПУ в зависимости от температуры окружающей среды

Понижение температуры окружающей среды с плюс 15 °С до минус 15 °С в диапазоне начального давления от 10 бар до 150 бар приводит к снижению мощности ПТ на 17–41%, снижению расхода пара на 9–34%, снижению площади поверхности КУ на 9–36%, и увеличению температуры уходящих газов на 6–15%.

По мере снижения начального давления P_0 с 150 бар до 66 бар (при $t_a=15$ °С), до 46 бар (при $t_a=0$ °С) и до 38 бар (при $t_a=-15$ °С) степень влажности пара достигает минимального (нулевого) значения. Это значит, что при указанных начальных давлениях исключается эрозия рабочих лопаток ПТ. При этом мощность ПТ $N_э$ достигает максимальных значений.

Исследовано влияние давления P_k в конденсаторе на показатели ГПУ (рисунок 8).

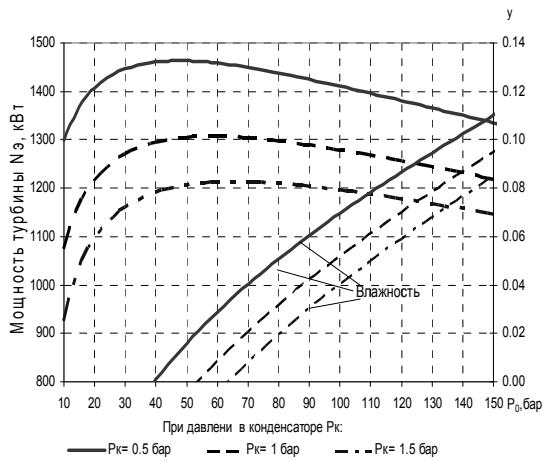


Рисунок 8. Влияние давления P_k в конденсаторе на показатели ГПУ

Повышение конечного давления P_k , при начальном давлении пара на входе в ПТ $P_0 = 10$ бар, приводит к снижению мощности $N_э$ ПТ на 29%, а при начальном давлении пара $P_0 = 150$ бар к снижению мощности $N_э$ ПТ на 15%. По мере снижения начального давления пара P_0 с 150 бар до 26 бар (при $P_k = 0,5$ бар), до 37 бар (при $P_k = 1$ бар) и до 46 бар (при $P_k = 1,5$ бар) влажность за ПТ достигает минимального (нулевого) значения. Мощность ПТ $N_э$ достигает максимального значения $N_э = 1450$ кВт (при $P_k = 0,5$ бар), $N_э = 1300$ кВт (при $P_k = 1$ бар), $N_э = 1200$ кВт (при $P_k = 1,5$ бар).

Исследовано влияние минимального температурного напора $\Delta t_{исп}$ на холодном конце испарителя КУ на показатели ГПУ (рисунок 9).

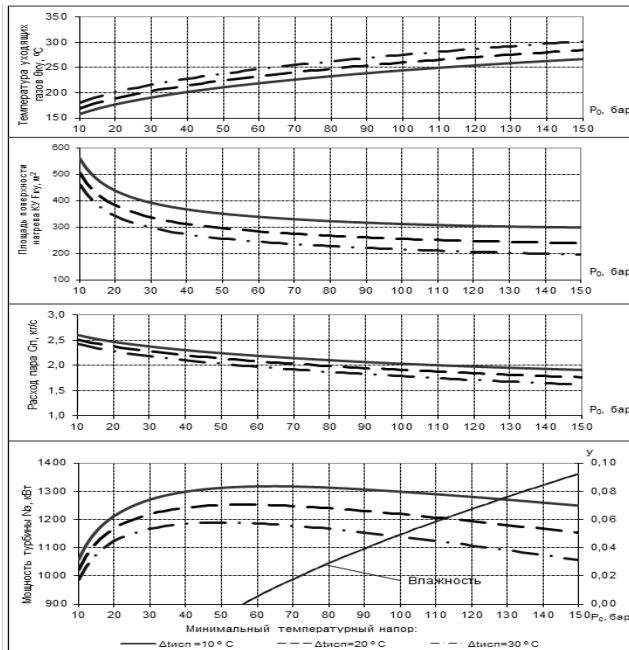


Рисунок 9. Влияние минимального температурного напора на холодном конце испарителя КУ на показатели ГПУ

Повышение $\Delta t_{исп}$ с 10 °C до 30 °C, в диапазоне начального давления от 10 бар до 150 бар приводит к снижению мощности ПТ на 7–15%, снижению расхода пара на 6–15%, снижению площади поверхности КУ на 18–34%, а температура уходящих газов в среднем повышается на 13%. По мере снижения начального давления P_0 с 150 бар до 60 бар (при $\Delta t_{исп} = 10$ °C), до 58 бар (при $\Delta t_{исп} = 20$ °C) и до 50 бар (при $\Delta t_{исп} = 30$ °C), мощность ПТ $N_э$ достигает максимального значения: 1317 кВт, 1252 кВт, 1190 кВт соответственно. Вне зависимости от $\Delta t_{исп}$ влажность пара за ПТ приобретает минимальное (нулевое) значение при $P_0 = 56$ бар.

Исследовано влияние относительного внутреннего КПД η_{oi} ПТ на показатели ГПУ (рисунок 10).

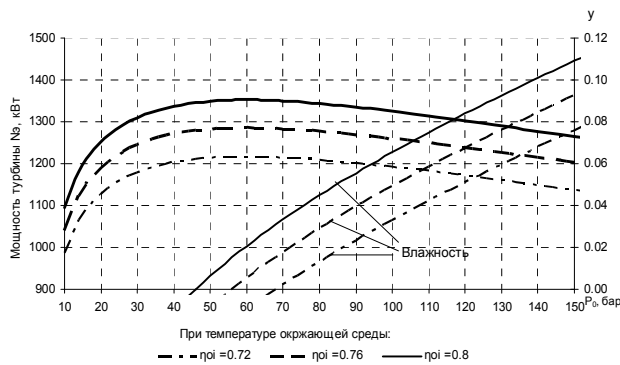


Рисунок 10. Влияние КПД η_{oi} ПТ на показатели ГПУ

На основе проведенных исследований определены параметры парового контура: давление пара на входе в ПТ $P_0=50$ бар; температура пара на входе в ПТ $t_0=457$ °С; давление в конденсаторе $P_k=1,1$ бар; кпд ПТ η_{oi} 76%.

Величина электрической мощности $Nэ$ ПТ на расчетном режиме (при $t_a=15$ °С) составила 534 кВт, что достаточно для обеспечения КС «СЕВЕРНАЯ» электроэнергией на собственные нужды. При этом доля уходящих газов, направляемых в котел-утилизатор, составляет 40,6 % (8,81 кг/с). Температура уходящих газов на выходе из КУ 218 °С.

По составленной математической модели и программам GateCycle и КГПТУ проведен численный эксперимент. Сопоставление результатов расчетов показало незначительное расхождение 1,5%. Это свидетельствует о правильности составленной методики расчета выбранной тепловой схемы ГПУ.

С целью определения аэродинамического сопротивления КУ и выбора дымососа проведены тепловой, аэродинамический и компоновочный расчеты КУ, в результате которых определены тепловые напоры в пинч — точка, рассчитана площадь теплообмена КУ и аэродинамическое сопротивление КУ. Полное аэродинамическое сопротивление КУ составило $\Delta p=1751$ Па. Мощность электропривода дымососа 21,5 кВт. В результате выбран дымосос ДН13Х.

В главе 5 рассмотрена тепловая схема ГПУ с органическим рабочим телом. Тепловая схема такой ГПУ состоит из трех контуров: I-газовый контур; II-промежуточный контур; III-паровой контур (см. рисунок 11).

В качестве теплоносителя промежуточного контура выбрано термическое масло марки АМТ-300Т. В качестве рабочего тела рассмотрены следующие ОРТ: пентан (C_5H_{12}), фреон R245fa (pentafluoropropane), гексаметилдесилоксан hexamethyldisiloxane, фреон R11 (trichlorofluoromethane). Составлена математическая модель и представлена методика расчета тепловой схемы.

Понижение относительного внутреннего КПД η_{oi} ПТ с 0,8 до 0,72, в диапазоне начального давления P_0 от 10 бар до 150 бар приводит в среднем к снижению мощности $Nэ$ ПТ 10%. По мере снижения начального давления пара P_0 с 150 до 34 бар (при $\eta_{oi} = 80\%$), 37 бар (при $\eta_{oi} = 76\%$) и 46 бар (при $\eta_{oi} = 72\%$) влажность за ПТ достигает минимального (нулевого) значения.

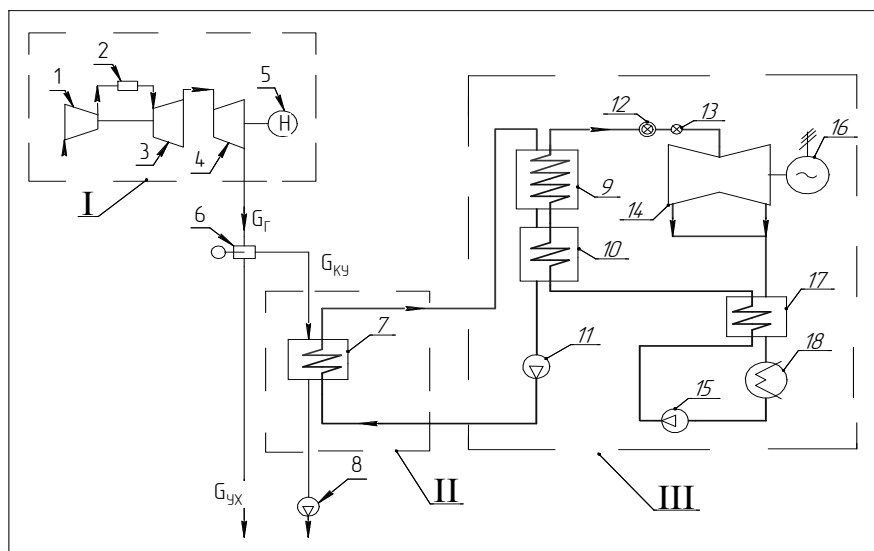


Рисунок 11. ГТУ с органическим рабочим телом: I-газовый контур; II-промежуточный контур; III-паровой контур; 1- компрессор; 2-камера сгорания; 3- компрессорная турбина; 4-силовая турбина; 5-нагнетатель; 6- шиберная заслонка; 7- термоасляный котел-утилизатор; 8-дымосос; 9-испаритель; 10-подогреватель; 11- циркуляционный насос; 12-стопорный клапан; 13-регулирующий клапан; 14-паровая турбина; 15-питательный насос; 16- электрогенератор; 18-конденсатор

Определены необходимые исходные данные для проведения расчетов (таблица 2).

Таблица 2

| Параметр | Обозначение | Размерность | Тип ОРТ парового контура | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|--------------------------|------------|---------|---------|
| | | | HMDS O | R245f a | R11 | C5H12 |
| Эффективная мощность ГТУ | N_e | кВт | 5200 | | | |
| Температура уходящих газов за ГТУ | t_4 | °C | 490 | | | |
| Расход уходящих газов за ГТУ в зависимости от температуре окружающей среды: $t_a = -15$ °C; $t_a = 0$ °C; $t_a = 15$ °C. | G_g | кг/с | 18.5 19.7 21.7 | | | |
| Расход топливного газа | V_T | кг/с | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 |
| Низшая теплота сгорания топлива | Q_H | кДж/кг | 44300 | 44300 | 44300 | 44300 |
| Расход воздуха на входе в компрессор ГТУ | G_B | кг/с | 21.28 | 21.28 | 21.28 | 21.28 |
| Коэффициент использования топлива в КС | $\eta_{к.с.}$ | - | 0.995 | 0.995 | 0.995 | 0.995 |
| Коэффициент избытка воздуха | α | - | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 |
| Температура пара на входе в турбину | t_0 | °C | 235 | 140 | 170 | 180 |
| Давление пара на входе в турбину | P_0 | МПа | 0.6-1.5 | 0.8-2.5 | 0.7-2.5 | 0.6-2.5 |
| Давление в конденсаторе | P_K | МПа | 0.11 | 0.21 | 0.11 | 0.11 |
| Температура ОРТ на входе в ПН | $t_{пв}$ | °C | 100 | 31.8 | 23.0 | 35.5 |
| Относительный внутренний КПД ПТ | η_{oi} | - | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| Механический КПД ПТ | η_m | - | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| КПД ПН | $\eta_{пн}$ | - | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| КПД редуктора | $\eta_{ред}$ | - | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 |
| КПД электрического генератора $\eta_э$ | $\eta_э$ | - | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.97 |

Исследовано влияние изменения температуры окружающей среды и влияние выбора типа ОРТ на основные показатели ГТУ (рисунок 12).

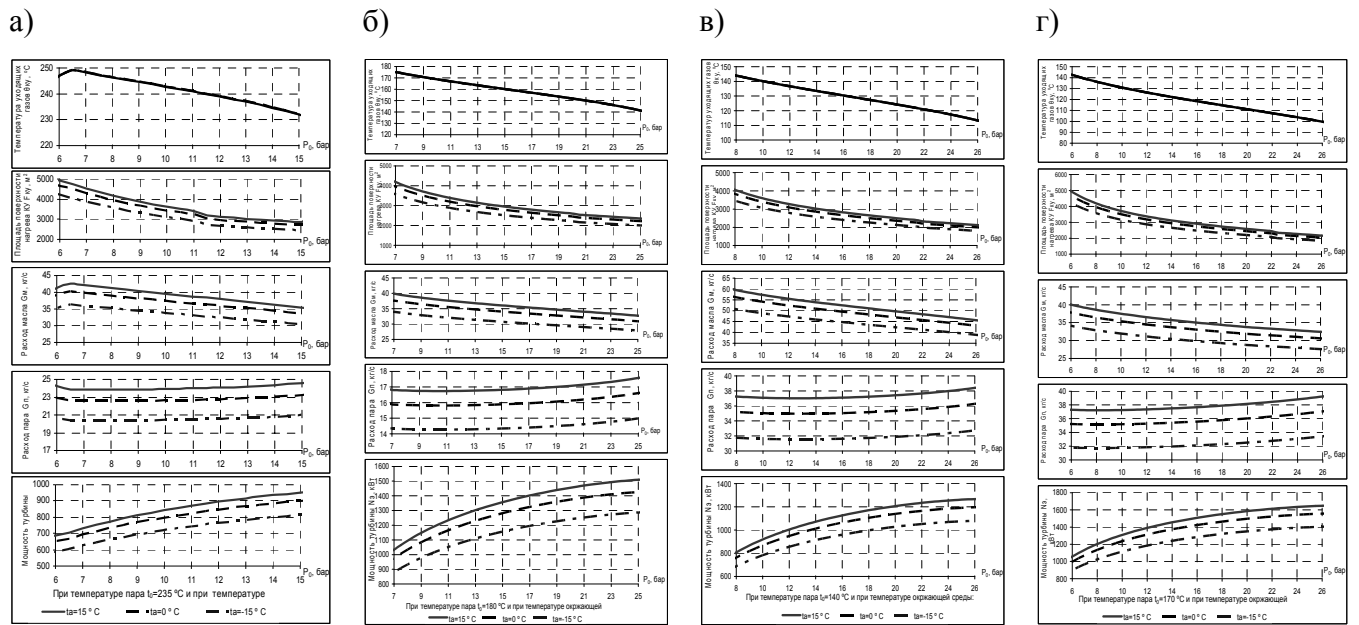


Рисунок 12. Изменение основных параметров ГПУ
в зависимости от температуры окружающей среды t_a :
а) для гексаметилдисилоксана; б) для пентана (C_5H_{12});
в) для трихлорфторметана (R11) и г) для пентафторпропана (фреон R245fa)

Из рисунка 12 а) видно, что в случае применения гексаметилдисилоксана понижение температуры окружающей среды с плюс 15 °С до минус 15 °С в диапазоне начального давления от 6 бар до 15 бар приводит к понижению мощности ПТ на 14–15%, понижению расхода пара на 14–14%, понижению расхода масла на 15–15%, снижению суммарной поверхности теплообмена на 15–15%, и понижению температуры уходящих газов на 7%.

Из рисунка 12 б) видно, что в случае применения пентана (C_5H_{12}) понижение температуры окружающей среды с плюс 15 °С до минус 15 °С в диапазоне начального давления от 8 бар до 26 бар приводит к понижению мощности ПТ на 15–15%, понижению расхода пара на 15–15%, понижению расхода масла на 15–15%, понижению площади поверхности КУ на 15–15%, и понижению температуры уходящих газов на 25%.

Из рисунка 12 в) видно, что в случае применения трихлорфторметана (R11) понижение температуры окружающей среды с плюс 15 °С до минус 15 °С в диапазоне начального давления от 7 бар до 25 бар приводит к понижению мощности ПТ на 15–15%, снижению расхода пара на 15–15%, понижению расхода масла на 13–15%, снижению площади поверхности КУ на 15–15%, и снижению температуры уходящих газов 19%.

Из рисунка 12 г) видно, что в случае применения пентафторпропана (фреон R245fa) понижение температуры окружающей среды с плюс 15 °С до минус 15 °С в диапазоне начального давления от 6 бар до 26 бар приводит к понижению мощности ПТ на 15–15%, снижению расхода пара на 15–15%, понижению расхода масла на 15–15%, снижению площади поверхности КУ на 15–15%, и уменьшения температуры уходящих газов на 34%.

Для рассмотренных ОРТ построены t - s диаграммы органического цикла Ренкина (ОЦР) (рисунок 13).

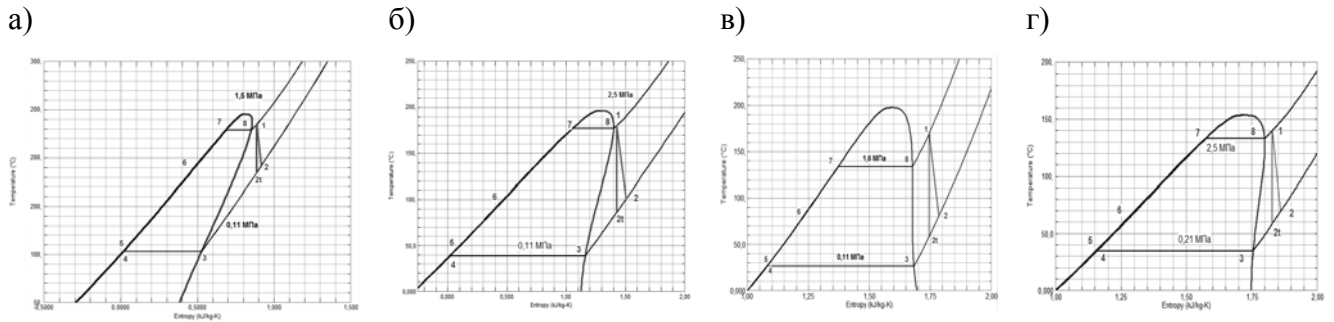


Рисунок 13. T , s - диаграммы органического цикл Ренкина:
 а) для гексаметилдисилоксана; б) для пентана (C_5H_{12});
 в) для трихлорфторметана (R11) и г) для пентафторпропана (фреон R245fa)

Анализ ОЦР циклов показал, что для рассматриваемых ОРТ пограничная кривая пара в t , s координатах имеет положительный наклон, поэтому процесс расширения заканчивается в области перегретого пара, что исключает, в отличие от турбин водяного пара, появление конденсата в конце процесса расширения, и соответствующие потери энергии, а также эрозию лопаток рабочих колес. Другим фактором, создающим благоприятные условия функционирования лопаток рабочих колес, являются сравнительно низкая температура на входе в турбину. При такой температуре еще не проявляется явление ползучести, поэтому время нахождения лопаток под нагрузкой не оказывает влияния на прочностные характеристики их материалов (конструкционных сталей).

Также были построены h , s - диаграммы процесса расширения пара рассматриваемых ОРТ (рисунок 14).

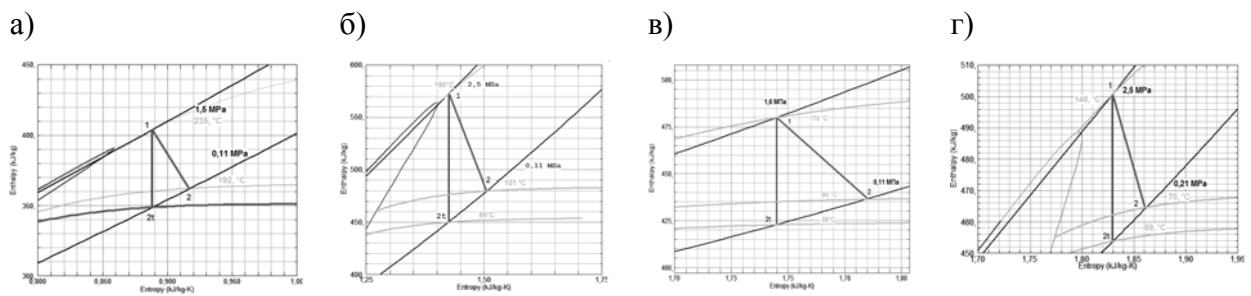


Рисунок 14. h , s - диаграммы процесса расширения:
 а) для гексаметилдисилоксана; б) для пентана (C_5H_{12});
 в) для трихлорфторметана (R11) и г) для пентафторпропана (R245fa)

Из анализа процесса расширения следует, что для рассматриваемых ОРТ процесс расширения пара в турбине идет при малом значении изоэнтروпийного теплоперепада энтальпии (от 50 до 120 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$). Это позволяет выполнить турбину одно-, трехступенчатой,

что существенно упрощает конструкцию турбины и снижает капитальные затраты на ее изготовление по сравнению с многоступенчатыми турбинами водяного пара.

Определены параметры УПТУ в составе ГПУ с ОРТ обеспечивающие выработку требуемой мощности ПТ для покрытия только собственных нужд КС «СЕВЕРНАЯ» при температуре окружающей среды $t_a=15\text{ }^{\circ}\text{C}$: рабочее тело парового контура— пентан; рабочее тело промежуточного контура—термическое масло АМТ-300 Т; начальное давление пара на входе в паровую турбину $P_0=25\text{ бар}$; начальная температура пара на входе в паровую турбину $t_0=180\text{ }^{\circ}\text{C}$; давление в конденсаторе $P_k=1,1\text{ бар}$. Электрическая мощность ПТ равна $N_{птэ}=530\text{ кВт}$. Мощность собственных нужд паротурбинной установки составляет $N_{с.н.}=29\text{ кВт}$. Мощность нетто ПТ равна $N_{\text{неттоПТ}}=501\text{ кВт}$, что достаточно для обеспечения электроэнергией на собственные нужды КС «СЕВЕРНАЯ». В случае использования пентана расход ОРТ ($G_{п}=6,2\text{ кг/с}$), расход термического масла ($G_{м}=11,5\text{ кг/с}$), площадь конвективных площадей КУ ($F_{ку}=79\text{ м}^2$) достигают минимальных значений по сравнению с другими рассмотренными ОРТ. Аэродинамическое сопротивление КУ составило $\Delta p_{1*}=164\text{ Па}$, что ниже максимально допустимого по СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-138-2007 $\Delta p=700\text{ Па}$. Мощность привода дымососа составила $N_{\text{дым}}=7\text{ кВт}$. Доля направляемых в котел-утилизатор уходящих газов ГТУ составила 35% (7,6 кг/с) от общего расхода уходящих газов ГТУ.

В главе 6 произведен сравнительный анализ характеристик УПТУ с пароводяным рабочим телом с характеристиками УПТУ с органическим рабочим телом. Даны следующие рекомендации:

1. Применять на ГКС, на которых в качестве привода ГПА используются ГТУ, УПТУ в составе ГПУ для обеспечения ГКС электроэнергией на собственные нужды.
2. Использовать только часть уходящих газов ГТУ ГПА необходимую для выработки в УПТУ электроэнергии только на собственные нужды ГКС, направляя их с помощью шиберных заслонок в КУ.
3. Устанавливать за КУ дымосос, привод которого будет работать за счет части мощности вырабатываемой в УПТУ, т.к. в этом случае установка КУ вообще никак не влияет на показатели ГТУ.
4. Применять незамерзающие при низких температурах ОРТ.
5. На ГКС, где эксплуатируются ГТУ с недостаточно высокой температурой уходящих газов для применения ГПУ с пароводяным рабочим телом (ГТК-10 НК-16СТ НК-12СТ ДР-59Л) применять УПТУ с ОРТ.
6. Среди рассмотренных ОРТ использовать в УПТУ пентан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны научно-технические основы создания утилизирующих паротурбинных установок для обеспечения ГЭС России электроэнергией на собственные нужды с учетом снижения экологической нагрузки на окружающую среду на примере КС «Северная».
2. Проведенный анализ структуры парка ГПА ГЭС России показал, что общее количество ГПА достигает 4252 шт., из них: 3388 ГПА имеют газотурбинный привод (80%); 701 ГПА с электроприводом (16%); 163 ГПА с газомоторкомпрессорным приводом (4%). Наиболее широкое использование для привода ГПА получили следующие ГТУ: ГТК-10 (646 шт.); НК-16СТ (618 шт.); НК-12СТ (322 шт.); ДР-59Л (268 шт.).
3. Проведен анализ суммарной величины располагаемой тепловой мощности уходящих газов всех ГТУ ГПА ГЭС России, которая составила 87.9 ГВт.
4. Анализ распределения годовых мощностей выбросов NO_x , CO_2 , CO , CH_4 показал, что наиболее значительные мощности выбросов исходят от следующих типов ГТУ: ГТК-10, НК-16СТ, ДР-59 Л, ГТН-25.
5. Определена фактическая средняя потребленная электрическая энергия КС «СЕВЕРНАЯ» за 1 час: 308 кВт в зимний период (декабрь-февраль); 131 кВт в летний период (июнь-август).
6. По методике СПбГПУ проведены расчеты основных характеристик ГТУ TAURUS 60 S в зависимости от P_k и t_a , определены температура и расход уходящих газов ГТУ.
7. Для ГПУ с одноконтурным котлом-утилизатором и пароводяным рабочим определены следующие основные параметры: начальное давление пара на входе в ПТ $P_0=50$ бар; начальная температура пара на входе в ПТ $t_0=457$ °С; давление в конденсаторе $P_k=1,1$ бар; относительный внутренний КПД ПТ $\eta_{oi}=76\%$; электрическая мощность ПТ $N_{э}=536$ кВт; доля уходящих газов, направляемых в котел-утилизатор, составила 41,8 % (9,1 кг/с); температура уходящих газов на выходе из КУ 218 °С; полное аэродинамическое сопротивление КУ $\Delta p=1023$ Па; мощность электропривода дымососа 21 кВт.
8. Для ГПУ с промежуточным термомасляным контуром и ОРТ выбраны и определены следующие основные параметры: рабочее тело парового контура— пентан; рабочее тело промежуточного контура—термическое масло АМТ-300 Т; начальное давление пара на входе в паровую турбину $P_0=25$ бар; начальная температура пара на входе в паровую турбину $t_0=180$ °С; давление в конденсаторе $P_k=1,1$ бар; электрическая мощность ПТ $N_{птэ}=530$ кВт; мощность собственных нужд $N_{с.н.}=29$ кВт; расход пентанового пара $G_{п}=6,2$ кг/с; расход термического масла $G_{м}=11,5$ кг/с; доля уходящих газов, направляемых в котел-утилизатор, составила 35% (7,6 кг/с); температура уходящих газов на выходе из КУ 110 °С; полное аэродинамическое сопротивление КУ $\Delta p1^*=164$ Па; мощность электропривода дымососа 21 кВт.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лыков, А.В. Анализ тепловых схем малых энергетических установок применительно к установке гидротермального окисления алюминия с водой / А.В. Лыков, В.А. Рассохин // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.— 2010.— С. 41.
2. Лыков, А.В. Оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов ГПА «ОАО ГАЗПРОМ» / А.В. Лыков, Н.А. Забелин, Рассохин В.А. // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. ЧIII.-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.— 2012.— С. 51.
3. Лыков, А.В. Парогазовая установка компрессорной станции «Северная» / А.В. Лыков, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин и др.// Наука и техника в газовой промышленности.—2013.—№ 4.
4. Лыков, А. В. Расчет тепловой схемы парогазовой установки на базе ГТУ Taurus 60 S в программе GateCycle [Электронный ресурс] / А.В. Лыков // СПбГПУ.— 2013.—[Режим доступа]: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3393.pdf>.
5. Лыков, А.В. Эмиссия загрязняющих веществ от газотранспортной системы ОАО «ГАЗПРОМ» / Н.А. Забелин, А.В. Лыков, В.А. Рассохин // Научно – технические ведомости. Наука и образование. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета. — 2013. — №3 — С. 294—305.
6. Лыков, А.В. Оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов газоперекачивающих агрегатов единой системы газоснабжения России / Н.А. Забелин, А.В. Лыков, В.А. Рассохин // Научно – технические ведомости. Наука и образование. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета.—2013.— №4.— С.136 — 145.
7. Лыков, А.В. Обеспечение электроэнергией собственных нужд компрессорной станции «Северная» за счет теплоты уходящих газов газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата / Лыков А.В., Забелин Н.А., Рассохин В.А.//. Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. Ч. 2. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та.—2014.— С. 91—94.