

На правах рукописи



МАРАСАНОВ НИКИТА ВЛАДИМИРОВИЧ

**КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕПЛОВАЯ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ
ЦИКЛОВ ОТТО И РЕНКИНА**

05.14.14 – «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на кафедре «Тепловые электрические станции»

Научный руководитель: **Щинников Павел Александрович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Тепловые электрические станции», заведующий кафедрой, г. Новосибирск

Официальные оппоненты: **Кудинов Анатолий Александрович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Тепловые электрические станции», профессор, г. Самара

Цепенюк Алексей Иванович
кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «ЗиО-Энерджи», генеральный директор, г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита состоится «10» июня 2022 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Олеся Владимировна Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опережающий рост тарифов на электроэнергию для промышленных потребителей, вызванный пересмотром ОАО «Федеральная сетевая компания ЕЭС» политики тарифного регулирования в области передачи энергии по сетям, обусловил массовый переход предприятий на альтернативные виды энергоресурсов. Одним из экономически обоснованных решений является применение газопоршневых установок (ГПУ).

Рост рынка газопоршневых установок за последние 10 лет превысил 1,5 млрд \$. Развитию рынка ГПУ способствуют так же открытие новых удаленных объектов нефтяных компаний, которым требуется автономное энергоснабжение, необходимость модернизации изношенного оборудования на имеющихся объектах, трудности с подключением к электросети в отдельных районах из-за ее ограниченной пропускной способности при общем росте потребления электроэнергии. Объекты малой генерации получили распространение в качестве стандартных решений во многих отраслях: промышленное производство, сектор ЖКХ, в частности, муниципальные котельные, транспортно-логистические комплексы, объекты инфраструктуры (торгово-развлекательные и офисные центры, гостиницы, больницы, и т.д.), агропромышленный комплекс, разработка месторождений и нефтедобыча.

Выделение тепла сопровождает любую технологию с сжиганием топлива при производстве электроэнергии. При выработке электроэнергии газопоршневые установки обладают высоким КПД (до 50 % у лучших образцов). Следовательно, используется только половина энергии, а остальное тепло уходит в окружающую среду.

Настоящая работа посвящена решению проблемы повышения эффективности использования энергии топлива в газопоршневых установках.

Степень разработанности. Одним из способов повышения топливной эффективности является введение системы утилизации тепла уходящих газов. Значительный вклад в исследование этого направления внесли многие исследователи: Селищев А.А., Бахмутов С.В., Теренченко А.С., Козлов А.В., Куянов Ю.Ф., Гаврилов А.М., Разуваев А.В., Костин Д.А., Кудашева И.О., Губатенко М.С., Горн Е.В., Красенюк И.С., Бастрон А.В., Белов А.В., Харитонов Д.А., Хуснуллина В.Р., Дологлонян А.В., а также их коллеги с кафедры Тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета Щинников П.А., Елистратов С.Л., Боруш О.В., Григорьева О.К., Францева А.А., Ноздренко Г.В., Синельников Д.С., а также их зарубежные коллеги Badami M., Campanile P., Anzioso F., Onovwiona H.I., Ugursal V.I., Fung A.S., Aliabadi A.A., Thomson M.J., Wallace J.S., Angrisani G., Roselli C., Sasso M., Canova A., Cavallero C., Freschi A., Giaccone L., Repetto M., Tartaglia M и др. Однако, их работы направлены на изучение систем когенерации и тригенерации, которые не всегда могут обеспечить максимальную топливную эффективность ввиду возможного небаланса в потреблении тепловой и электрической энергии, а также на исследование способов утилизации низкопотенциального сбросного тепла.

Цель диссертационной работы – повышение энергетической эффективности ГПУ за счет сочетания циклов Отто и Ренкина с увеличением выработки электроэнергии.

Задачи для достижения цели диссертационной работы:

- 1) Разработка технологических схем сочетания циклов Отто и Ренкина на основе вновь проектируемого и серийно изготавливаемого оборудования:
 - с многоступенчатой лопаточной турбиной;
 - с одноступенчатой трехвенечной турбиной;
 - с паровинтовой машиной;
 - мультимодульная схема с несколькими ГПУ и мощной паровой турбиной;
 - с турбиной на низкокипящем рабочем теле;
- 2) Разработка методических положений по определению:
 - предельных значений эффективности энергетических установок на основе сочетания циклов Отто и Ренкина;
 - энергетических, расходных и конструктивных характеристик котла-утилизатора;
 - энергетических, расходных и конструктивных характеристик паровых турбин лопаточного типа сверхмалой мощности;
 - методики технико-экономического сравнения вариантов различного исполнения энергетических установок с учетом определения капиталовложений в несерийное оборудование.
- 3) Определение термодинамических и массорасходных параметров рассматриваемых сочетаний циклов при обеспечении наилучшей термодинамической эффективности;
- 4) Анализ работы комбинированных установок с использованием различных рабочих тел и выработка практических рекомендаций по их применению.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Разработана технологическая схема утилизации теплоты уходящих газов ГПУ с целью дополнительной выработки электроэнергии и повышения топливной эффективности;

2) Разработаны методические положения для анализа комбинированной установки, включающие в себя методику определения предельных значений эффективности, методику выбора основного оборудования, методики для расчета котла-утилизатора и паровой турбины несерийного типа, методику для оценки капиталовложений во вновь создаваемое оборудование;

3) Проведена оценка результатов исследования вариантов реализации комбинированной ТЭС на базе циклов Отто и Ренкина, различающиеся между собой конструктивом паровой машины, используемым рабочим телом и конфигурацией первичных двигателей – ГПУ;

4) Проведена оценка экономических показателей комбинированных энергоустановок: расходов топлива, капиталовложений в установки, эксплуатационных затрат, себестоимости отпускаемой электроэнергии и эффективности инвестиций.

Практическая значимость работы заключается в том, что на базе проведенного исследования получены результаты повышения эффективности использования топлива для различных вариантов оборудования, используемого в паросиловой надстройке, и разных конфигураций энергетических установок на базе ГПУ при этом выработаны рекомендации по применению паровых турбин разных типов при сочетании циклов Отто и Ренкина. Результаты работы используются в учебном процессе НГТУ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории термодинамики, тепломассопереноса, энергобалансов, нормативные методы расчета энергетического оборудования, оценки эффективности инвестиций.

Для автоматизации вычислений применялась программа MS Excel.

Достоверность результатов обусловлена применением в методах исследований фундаментальных законов термодинамики и теплообмена; положений нормативных методов расчетов котлов и турбин; использованием методологии энергобалансов; сопоставлением результатов с фактическими показателями действующего оборудования, а также со сложившейся конъюнктурой цен на аналогичные или подобное энергетическое оборудование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методические положения для анализа комбинированной установки, включающие в себя методику определения предельных значений эффективности, методику выбора основного оборудования, методики для расчета котла-утилизатора и паровой турбины несерийного типа и методику оценки капиталовложений в несерийное оборудование.

2. Оценка результатов исследования вариантов реализации комбинированной ТЭС на базе циклов Отто и Ренкина, различающихся между собой конструктивом паровой машины, используемым рабочим телом и конфигурацией первичных двигателей – ГПУ;

3. Оценка экономических показателей комбинированных энергоустановок: расходов топлива, капиталовложений в установки, эксплуатационных затрат, себестоимости отпускаемой электроэнергии и эффективности инвестиций.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» по формуле специальности:

- исследования по существенным особенностям технических процессов, характерных для систем, установок и агрегатов, связанных единым техническим циклом производства электроэнергии и обоснования новых технологий производства электрической энергии;

по областям исследований:

п.2. исследование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций;

п.3. разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий производства электрической энергии;

п.4. разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования.

Связь темы с научно-техническими программами развития. Тематика работы соответствует программе развития Новосибирской области "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности Новосибирской области", а также направлению Н2 стратегии НТР РФ «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (2016 г. Челябинск), IV российской молодежной научной школе-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (2016 г. Томск), Всероссийской научно-практической конференции магистрантов и аспирантов «Science in Progress» (2016 г. Новосибирск), Седьмой международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике» (2017 г. Ульяновск), «13 International forum on strategic technology (IFOST 2018)» (2018, Харбин), Всероссийской научной конференции с международным участием «Семинар вузов по теплофизике и энергетике» (2019 г. Санкт-Петербург), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (2016-2017 гг. Новосибирск), XV Международной научно-технической конференции «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (2020 г. Саратов), Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Системные исследования в энергетике – 2021» (2021 г. Иркутск).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 2 статьи в научных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ), 9 публикаций в сборниках материалов и трудов конференций всероссийского и международного уровня.

Личный вклад. Все результаты без ссылок на другие источники принадлежат автору. Автором с коллегами подготовлены статьи в отечественные и зарубежные журналы. Личный вклад автора в опубликованных материалах составляет не менее 65 %.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований. Текст диссертации изложен на 156 страницах печатного текста, содержит 53 рисунка, 45 таблиц, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены основные положения диссертации, сформулированы новизна, значимость, методы, личный вклад, положения, выносимые на защиту.

В первой главе показан путь развития ДВС, показаны способы повышения их экономических и экологических показателей. Показана способность ДВС работать в системах когенерации, то есть производить совместно электрическую и тепловую энергию. Отмечено, что в таких системах может быть достигнута эффективность использования топлива свыше 80 %, однако, зачастую отсутствует баланс в потреблении тепловой и электрической энергии, и выработка тепла становится недостаточной или невозможной. Поэтому целесообразным является повышение электрической эффективности подобных топливоиспользующих энергетических установок.

В настоящей работе в основу повышения электрической эффективности энергетических ГПУ, как одного из наиболее широко применяемых типов ДВС, положена технология комбинированного производства электроэнергии при сочетании циклов Отто и Ренкина с использованием тепла уходящих газов в паросиловом цикле.

Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе ведется разработка технологии сочетания циклов Отто и Ренкина, предназначенной для повышения электрической выработки путем утилизации теплоты выхлопных газов газопоршневой установки в паросиловом контуре и даются рекомендации по выбору основного оборудования.

Принципиальная тепловая схема установки включает в себя газопоршневую установку (ГПУ), котел-утилизатор (КУ), паровую турбину (ПТ), конденсатор (К), подогреватель рубашки охлаждения (П), деаэратор (Д), редукционно-охладительную установку (РОУ), конденсатный (КН) и питательный (ПН) насосы (Рисунок 1).

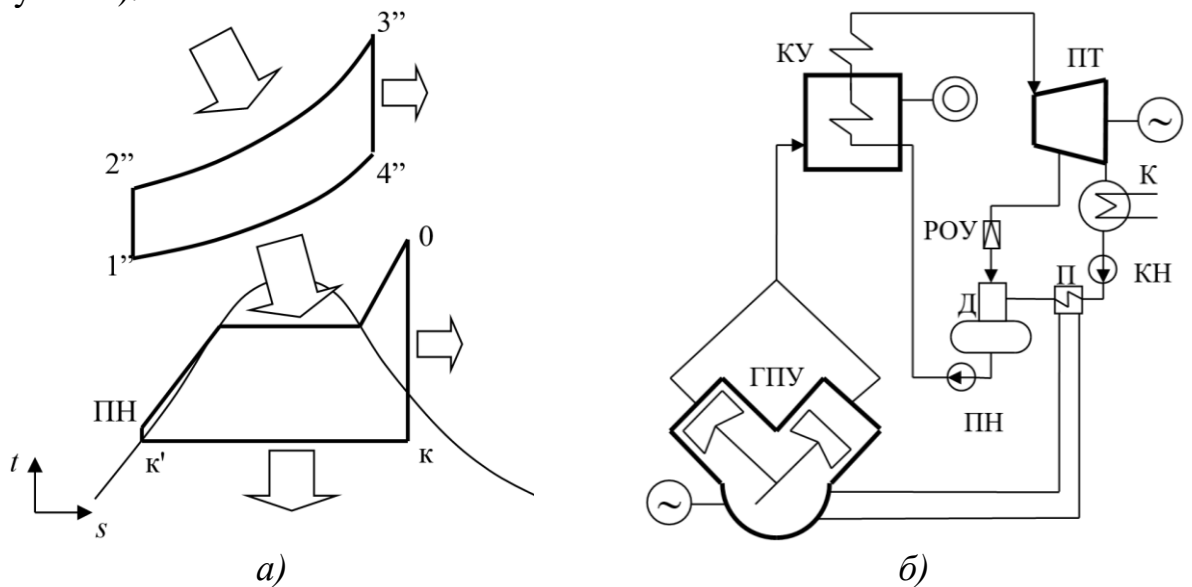


Рисунок 1 – Термодинамическая диаграмма (а) и принципиальная тепловая схема (б) энергетической установки на базе ДВС и паровой турбины: 1''-2''-3''-4''-1'' – цикл Отто; 0-к'-ПН-0 – цикл Ренкина; стрелками показаны направления потоков энергии; ГПУ – газопоршневая установка; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина; К – конденсатор; П – подогреватель; Д – деаэратор; РОУ – редукционно-охладительная установка; КН, ПН – конденсатный и питательный насосы.

Отработавшие в ГПУ газы поступают в котел-утилизатор, где генерируют пар высоких параметров, который направляют в паровую турбину. Пар, совершив работу в паровой турбине, поступает в конденсатор, где обеспечивается процесс передачи теплоты в окружающую среду (в термодинамическом плане – холодному телу, Рисунок 1а) и, одновременно, процесс конденсации пара. Затем конденсатным насосом основной конденсат направляют в деаэратор. Перед деаэратором основной конденсат нагревают в подогревателе за счет утилизации теплоты контура охлаждения собственно ГПУ. В деаэраторе обеспечивается очистка от газов основного конденсата и одновременный его нагрев за счет отбора пара из турбины. Для обеспечения постоянства давления деаэрации установлена редуционно-охладительная установка. После деаэрата питательным насосом вода подается в котел-утилизатор, в котором она, пройдя через водяной экономайзер, попадает в барабан, из которого циркуляционным насосом направляется в испаритель и, уже в виде пароводяной смеси, направляется обратно в барабан для сепарации пара от воды. После барабана пар проходит пароперегреватель и направляется в паровую турбину. Дымовые газы после КУ выбрасываются в окружающую среду через дымовую трубу.

Понимая под эффективностью коэффициент полезного действия (КПД) установки и рассматривая цикл Отто (Рисунок 1а), последний можно определить по выражению

$$\eta_{\text{ГПУ}} = \frac{N_{\text{ГПУ}}}{Q_{\text{под}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ГПУ}}$ – электрическая мощность на клеммах генератора, МВт; $Q_{\text{под}}$ – теплота, подведенная с топливом к ГПУ, МВт.

Учитывая закон сохранения энергии, количество теплоты, бесполезно теряемой в ГПУ, составит

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{под}} - N_{\text{ГПУ}}. \quad (2)$$

Фактически, уходящая теплота $Q_{\text{отв}}$ становится входным потоком для пароводяного цикла Ренкина, эффективность (КПД) которого можно определить по выражению

$$\eta_{\text{ПТУ}} = \frac{N_{\text{ПТУ}}}{Q_{\text{отв}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{ПТУ}}$ – электрическая мощность на клеммах генератора паровой турбины, МВт.

Полная энергия, полученная от комбинированной установки

$$\begin{aligned} N_{\Sigma} &= N_{\text{ГПУ}} + N_{\text{ПТУ}} = \eta_{\text{ГПУ}} Q_{\text{под}} + \eta_{\text{ПТУ}} (1 - \eta_{\text{ГПУ}}) Q_{\text{под}} = \\ &= (\eta_{\text{ГПУ}} + \eta_{\text{ПТУ}} - \eta_{\text{ГПУ}} \eta_{\text{ПТУ}}) Q_{\text{под}}. \end{aligned} \quad (4)$$

КПД установки в целом можно определить по выражению

$$\eta_{\Sigma} = \frac{N_{\Sigma}}{Q_{\text{под}}}, \quad (5)$$

С учетом (4) и необратимости процессов, выражение (5) приобретет вид

$$\eta_{\Sigma}^{\text{нетто}} = (\eta_{\text{ГПУ}} + \eta_{\text{ПТУ}}) \eta_{\text{необр}} \eta_{\text{СН}} - \eta_{\text{ГПУ}} \eta_{\text{ПТУ}} \eta_{\text{необр}}^2 \eta_{\text{СН}}^2. \quad (6)$$

С использованием (6) получена зависимость, которая позволяет оценить предельные значения КПД при реализации схем с сочетанием циклов Отто и Ренкина, Рисунок 2.

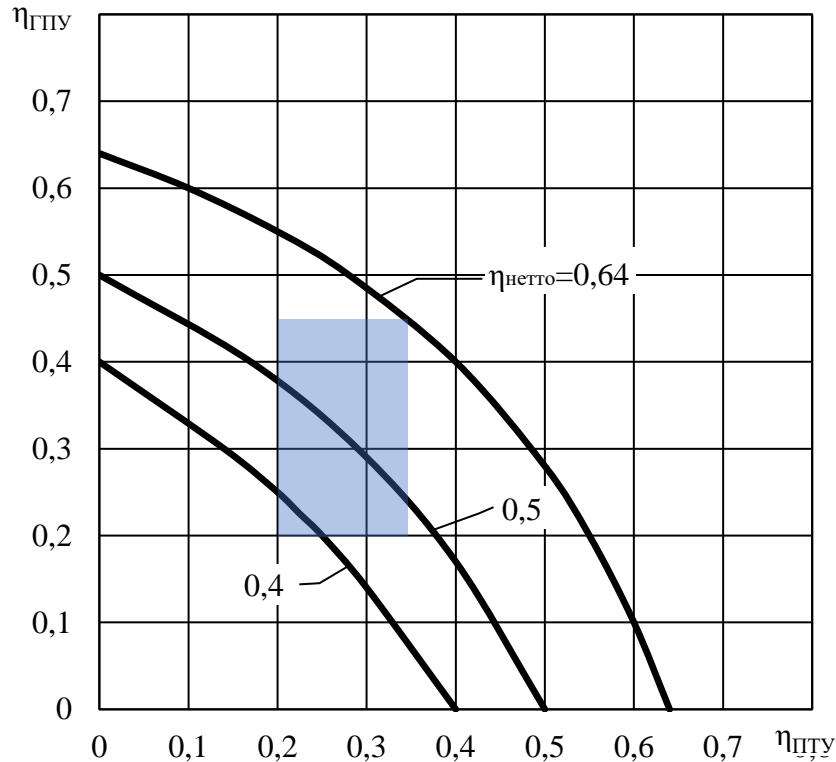


Рисунок 2 – Зависимость КПД ГПУ от КПД ПТУ при обеспечении КПД-нетто установки на уровне 0,4-0,64

При построении зависимости принято, что КПД необратимости составляет 0,9, а коэффициент собственных нужд – 0,95.

Следует отметить, что для реализации представленной схемы (Рисунок 1) могут быть использованы ГПУ с единичными мощностями до 18,3 МВт, при этом единичные мощности ПТУ могут быть на уровне 0,5-2 МВт. Для ГПУ указанная мощность одна из самых высоких, для ПТУ такие значения считаются невысокими. Для подобных малых и сверхмалых установок высокие значения КПД, характерные для мощных энергетических ПТУ, недостижимы. В первую очередь это обусловлено низкой температурой подвода теплоты в цикл (процесс ПН-0, Рисунок 1а), как правило, не превышающей 350-500 °С.

Можно видеть, что для вновь проектируемого оборудования предельные значения КПД приближаются к 64 % (правый верхний угол затененной области). С другой стороны, если современную ГПУ с КПД на уровне 0,4 оснастить паросиловой установкой с КПД на уровне 0,2, то КПД-нетто (отпуск электроэнергии) может быть увеличен на ~8 %.

Для обеспечения работы цикла Ренкина в рассматриваемой энергетической

установке применяют барабанный котел-утилизатор несерийного типа, который в своем составе имеет пароперегреватель, испаритель и водяной экономайзер. Для его расчета разработана методика, которая позволяет определить основные энергетические и массорасходные характеристики. В основе расчета КУ лежат уравнения его теплового баланса.

$$\left. \begin{aligned} Q_{\Gamma} &= \xi V_0 (h'_{\Gamma} - h''_{\Gamma}); \\ Q_{\Gamma} &= D_{\text{ип}} (h_{\text{ип}} - h_{\text{пв}}) + D_{\text{пр}} (h' - h_{\text{пв}}); \\ Q_{\Gamma} &= kF_{\text{ип}} \Delta t_{\text{ип}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В этих выражениях Q_{Γ} – теплота, отданная дымовыми газами, кВт; Q_{Γ} – теплота, воспринятая рассчитываемой поверхностью нагрева, при тепловосприятии котла-утилизатора, кВт; ξ – коэффициент сохранения тепла, учитывающий его потери в окружающую среду; $D_{\text{ип}}$ – паропроизводительность котла-утилизатора, кг/с; $h_{\text{ип}}$ – энтальпия перегретого или насыщенного пара на выходе из котла, кДж/кг; $h_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг; h' – энтальпия воды в барабане, кДж/кг; V_0 – объемный расход газов, м³/ч; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $D_{\text{пр}}$ – продувочный расход воды, кг/с; F – площадь поверхности нагрева, м²; Δt – температурный напор, °С.

Целью расчета является определение его массорасходных характеристик.

В основе теории теплового процесса, который происходит в паровых турбинах, лежат четыре уравнения, которые принято называть уравнениями движения: уравнение состояния; уравнение неразрывности, уравнение количества движения; уравнение сохранения энергии.

Уравнение состояния характеризует свойства рабочего тела и может быть представлено в следующем виде:

$$h = \frac{k}{k-1} pv + const. \quad (8)$$

Уравнение неразрывности связывает динамические характеристики потока и геометрические характеристики канала и в общем случае может быть записано в виде:

$$\int_{F_0}^{c_0} \frac{c_0}{v_0} dF_0 = \int_{F_1}^{c_1} \frac{c_1}{v_1} dF_1. \quad (9)$$

Уравнение количества движения характеризует энергетический потенциал парового потока и может быть представлено в виде:

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_0}^{p_1} v dp - \int_{x_0}^{x_1} R dx. \quad (10)$$

Уравнение сохранения энергии в дифференциальной форме имеет вид:

$$dh + cdc - dq + dL = 0. \quad (11)$$

Далее в работе на основе выражений (8)..(11) и укрупненного метода расчета конденсационных одноцилиндровых турбин формируются методические положения и алгоритм расчетов паровых турбин лопаточного типа применительно к рассматриваемой задаче.

Оценку мощности турбины ведут по выражению

$$N = \frac{D_{\text{шт}} H_0 \eta_{0i}}{m}, \quad (12)$$

где H_0 – располагаемый теплоперепад на турбину, кДж; $m = 1,039$ – учет недовыработки теплотой электроэнергии в системе регенерации; η_{0i} – внутренний относительный КПД турбины, определяется расчетами для вновь создаваемых турбин.

В третьей главе приведены результаты исследования вариантов реализации комбинированной ТЭС на базе циклов Отто и Ренкина, различающиеся между собой конструктивом паровой машины, используемым рабочим телом и конфигурацией первичных двигателей – ГПУ.

В первых трех вариантах используется уже упомянутая ранее (Рисунок 1) схема совмещения циклов. В первом случае используется многоступенчатая паровая турбина лопаточного типа. Во втором случае используется одноступенчатая паровая турбина лопаточного типа с трехвехенчатой ступенью скорости. В третьем случае для паросиловой надстройки принята серийно производимая паровинтовая машина.

Четвертый вариант комбинирования циклов освещает вопрос использования нескольких ГПУ и одной мощной серийной паровой турбины (Рисунок 3). Для него ряд газопоршневых установок представлен шестнадцатью машинами марки Wärtsilä 50SG суммарной мощностью 292,8 МВт, являющейся одной из наиболее мощных и эффективных ГПУ.

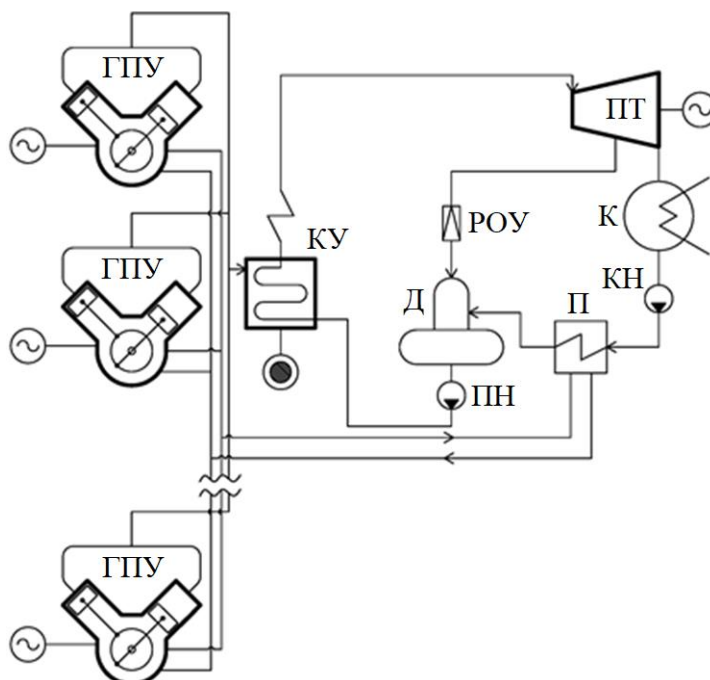


Рисунок 3 – Схема мультиблочной комбинированной ТЭС

КПД мультиблочной комбинированной ТЭС составит:

$$\eta_{\text{эл}}^{\text{ТЭС}} = \eta_{\text{эл}}^{\text{ГПУ}} + \delta_{\text{эл}}^{\text{ПТ}} = \frac{n_{\text{ГПУ}} N_{\text{ГПУ}} + N_{\text{ПТ}}}{n_{\text{ГПУ}} Q_{\text{топл}}}. \quad (13)$$

В пятом варианте рассматривается вопрос применения низкокипящего рабочего тела R600 в паросиловой части. Схема комбинированной энергоустановки на низкокипящем рабочем теле показана на Рисунке 4. Установка состоит из ГПУ, котла-утилизатора (КУ), фреоновой турбины (R), теплообменника (ТО), конденсатора (К) и питательного насоса (ПН).

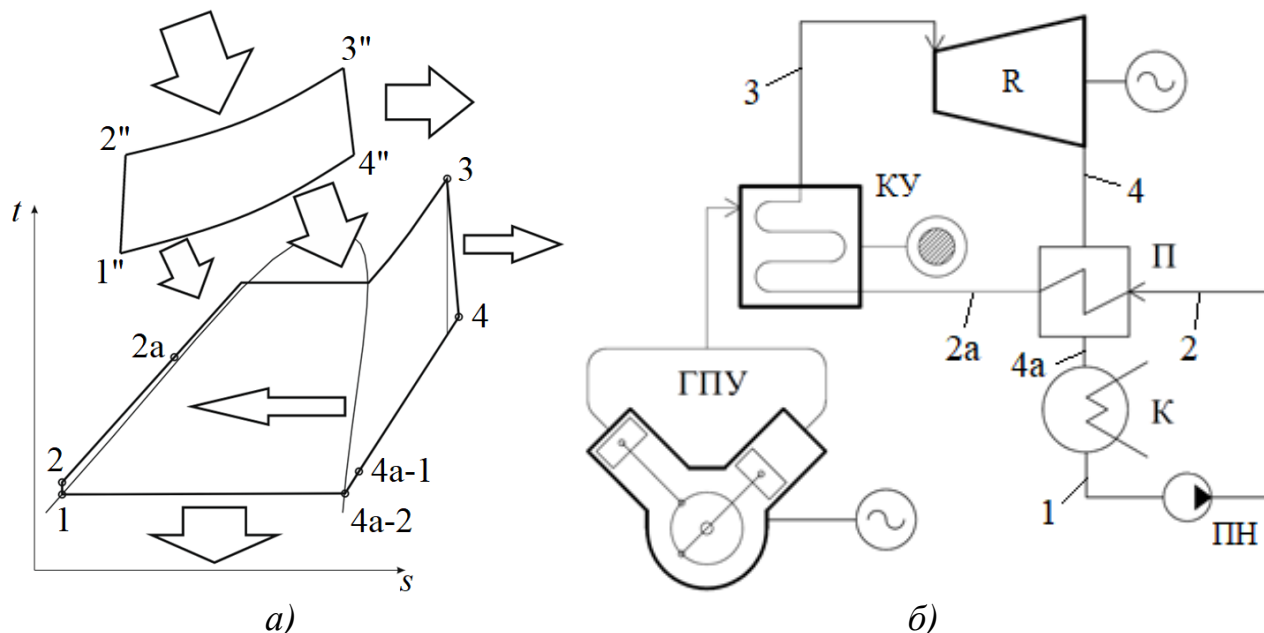


Рисунок 4 – Комбинированная ТЭС на низкокипящем рабочем теле:
 1''-2''-3''-4''-1'' – цикл Отто; 1-2-2a-3-4-4a-1 – органический цикл Ренкина;
 стрелками показаны направления потоков энергии; ГПУ – газопоршневая установка; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина; К – конденсатор; П – подогреватель; ПН – питательный насос

Поскольку температура в Точке 4 значительно выше, чем температура в Точке 2, в цикл внедрен подогреватель (П) для подогрева в процессе 2-2a за счет охлаждения перегретого пара в процессе 4-4a (Рисунок 5).

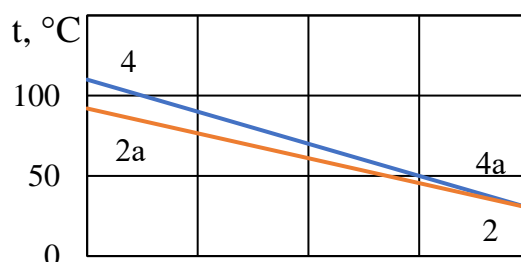


Рисунок 5 – График температурного напора в подогревателе

Проведен сравнительный анализ вариантов исполнения комбинированной энергетической установки на основе циклов Отто и Ренкина по энергетическим и расходным и характеристикам. Результаты расчетов сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристики комбинированных энергетических установок

№	Наименование	Размерность	Тип комбинированной энергоустановки				
			Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
			С много- ступен- чатой ПТУ	С одно- ступен- чатой ПТУ с трехве- нечной ступе- нью ско- рости	С паро- винто- вой ма- шиной	Муль- тиблоч- ная с од- ной ПТУ Т-30/2,9	С фрео- новой ПТУ
Значение							
1	Электрическая мощ- ность ГПУ, $N_{ГПУ}$	кВт	3044	1063	3044	292800	3859
2	Электрический КПД ГПУ, $\eta_{ГПУ}$	%	43,01	40,8	43,01	48,9	39,3
3	Потребление топлива ГПУ, $Q_{топл}$	кВт	7076	2607	7076	602464	9831
4	Электрическая мощ- ность ПТ, $N_{ПТ}$	кВт	475	189	212	26879	145
5	Суммарная электриче- ская мощность, N^{Σ}	кВт	3519	1252	3256	319679	4004
6	Расход рабочего тела, G_0	кг/с (т/ч)	0,566 (2,0)	0,5 (1,8)	0,82 (2,95)	61,1 (220)	1,706 (6,142)
7	Давление пара на входе в ПТ, p_0	МПа	3,783	0,985	1,37	2,9	2,5
8	Температура пара на входе в ступень тур- бины, p_0	°С	395	200	195	360	175
9	Внутренний относи- тельный КПД турбины, $\eta_{0i}^{ПТ}$	%	79,8	62,5	70,0	78,0	85,0
10	КПД комбинированной энергетической уста- новки, η^{Σ}	%	49,7	48,0	46,0	53,1	40,7
11	Прибавка КПД	%	6,7	7,3	2,99	4,5	1,5
12	Габаритные размеры паровой турбины						
	длина	мм	1880	1100	2420		
	ширина	мм	600	800	1300		
	высота	мм	800	1000	1440		

Наибольший внутренний относительный КПД (85 %) можно наблюдать у фреоновой паротурбинной установки, наименьший внутренний относительный КПД (62,5 %) – у одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости.

Во всех случаях (кроме варианта 4) установка может быть выполнена в блочно-модульном варианте, так как габариты турбины не превышают 2,5 м.

Проведена оценка КПД комбинированных энергоустановок (Рисунок 6).

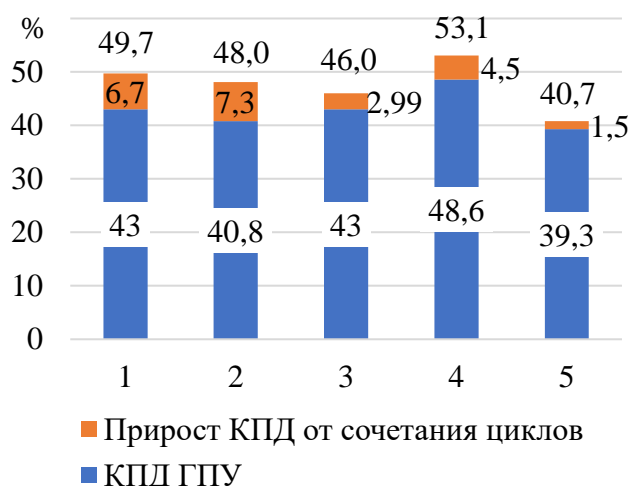


Рисунок 6 – КПД комбинированных энергоустановок по вариантам:

- 1 – с многоступенчатой ПТУ;
- 2 – с одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости;
- 3 – с паровинтовой машиной;
- 4 – мультиблочная с одной ПТУ;
- 5 – с фреоновой ПТУ

Максимальная прибавка КПД (7,3 %) обеспечена паросиловой установкой на базе одноступенчатой паровой турбины с трехвенечной ступенью скорости. Наибольший КПД комбинированной энергоустановки достигнут в случае мультиблочной ТЭС и составил 53,1 %. Наименьшая прибавка эффективности (1,5 %) получена в случае фреоновой паросиловой надстройки, КПД составил 40,7 %.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что наилучший прирост КПД обеспечивает одноступенчатая ПТУ с трехвенечной ступенью скорости, а наихудший – фреоновая паротурбинная установка, а наилучшую суммарную эффективность дает мультиблочная ТЭС.

В четвертой главе проводится оценка экономических показателей комбинированных энергоустановок: расходов топлива, капиталовложений в установки, эксплуатационных затрат, себестоимости отпускаемой электроэнергии и эффективности инвестиций.

Годовой расход условного топлива на отпущенную электроэнергию, т у т/год:

$$B^y = b_N^y \cdot \mathcal{E}_{\text{ОШ}} \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где b_N^y – удельный расход условного топлива по отпускаемой электроэнергии, г у т/кВт·ч:

$$b_N^y = b_N \frac{Q_H^p}{29,3}, \quad (15)$$

$\mathcal{E}_{\text{ОШ}}$ – электроэнергия, отпущенная с шин потребителю, кВт·ч/год;

b_N – удельный расход топлива по отпускаемой электроэнергии, г/кВт·ч;

$$b_N = \frac{B \tau_N}{\mathcal{E}_{\text{ОШ}}}, \quad (16)$$

где B – расход топлива в час, г/ч.

Произведена оценка влияния паросиловой надстройки на удельный расход условного топлива по сравнению с ГПУ (Рисунок 7).

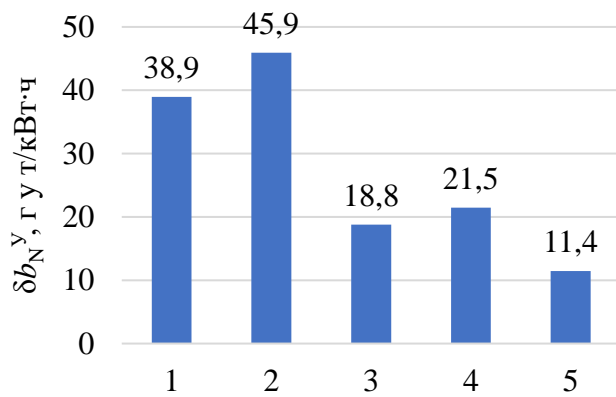


Рисунок 7. Сокращение удельных расходов условного топлива на отпускаемую электроэнергию по вариантам: 1 – с многоступенчатой ПТУ; 2 – с одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости; 3 – с паровинтовой машиной; 4 – мультиблочная с одной ПТУ; 5 – с фреоновой ПТУ

Результаты оценки расходов условного топлива показали, что наибольшее снижение расхода условного топлива (45,7 г у т/кВт·ч) достигнуто от внедрения паросиловой установки на базе одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости, а наихудший эффект (11,4 г у т/кВт·ч) наблюдается от внедрения комбинированной установки с фреоновой турбиной.

Капиталовложения в энергоблок, \$:

$$K^{\Sigma} = K_{ГПУ} + K_{КУ} + K_{ПТ} + K_{ПП} + K_{ТД} + K_{ДТ} + K_{ЭЛ} + K_{НПГ}, \quad (17)$$

где $K_{ГПУ}$ – капиталовложения в ГПУ; $K_{КУ}$ – капиталовложения в котел-утилизатор; $K_{ПТ}$ – капиталовложения в паровую турбину; $K_{ПП}$ – капиталовложения в паропроводы; $K_{ТД}$ – капиталовложения в тягодутьевое оборудование; $K_{ДТ}$ – капиталовложения в дымовую трубу; $K_{ЭЛ}$ – капиталовложения в электрооборудование; $K_{НПГ}$ – капиталовложения в низкопотенциальную группу.

Для оценки капиталовложений в агрегаты разработана методика, в основе которой применяется степенная зависимость вида:

Капиталовложения в агрегат m , \$:

$$K_m = K_0 \cdot \prod_{i=1} c_i \cdot \prod_{j=1} \left(\frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \quad (18)$$

где K_0 – базовое значение капиталовложений в агрегат m , \$; c_i – коэффициенты приведения для агрегата m ; x_j , x_j^0 , n_j – определяющие параметры, базовые значения параметров и показатели степени для агрегата m соответственно.

Удельные капиталовложения, \$/кВт:

$$K_{уд} = K^{\Sigma} / N. \quad (19)$$

Проведен сравнительный анализ вариантов исполнения комбинированной энергетической установки на основе циклов Отто и Ренкина по капиталовложениям. Результаты расчетов сведены в Таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты оценки капиталовложений по вариантам

№	Наименование	Размерность	Тип комбинированной энергоустановки				
			Вариант 4	Вариант 5	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
			С многоступенчатой ПТУ	С одноступенчатой ПТУ с трехвечной ступенью скорости	С паровинтовой машиной	Мультиблочная с одной ПТУ Т-30/2,9	С фреоновой ПТУ
1	Удельные капиталовложения в ГПУ	\$/кВт	411	482	411	500	387
		тыс. руб./кВт	30,9	36,1	30,9	37,5	29,0
2	Удельные капиталовложения в паросиловую надстройку	\$/кВт	660	508	688	383	2311
		тыс. руб./кВт	49,5	38,1	51,6	28,7	173,3
3	Удельные капиталовложения в комбинированную ТЭС	\$/кВт	445	486	429	490	457
		тыс. руб./кВт	33,4	36,4	32,2	36,8	34,2
4	Изменение удельных капиталовложений после внедрения ПТУ	%	+8,15	+0,82	+4,37	-1,97	+18,07

Внедрение паросиловой надстройки различным образом влияет на удельную стоимость ТЭС. Расчеты показали, что наибольшую удельную стоимость (2311 \$/кВт) имеет паросиловая установка с фреоновой ПТУ (Рисунок 8), и ее внедрение вызывает удорожание всей комбинированной ТЭС на 18 %.

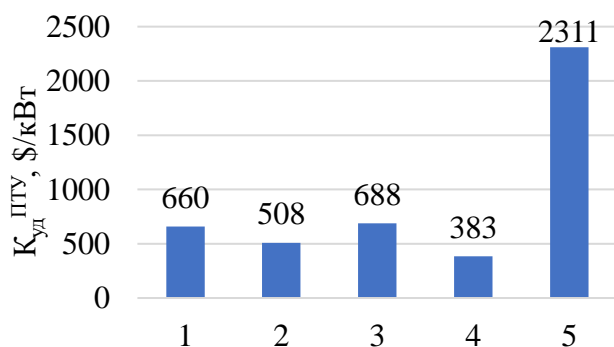


Рисунок 8 – Удельные капиталовложения в ПТУ по вариантам: 1 – с многоступенчатой ПТУ; 2 – с одноступенчатой ПТУ с трехвечной ступенью скорости; 3 – с паровинтовой машиной; 4 – мультиблочная с одной ПТУ; 5 – с фреоновой ПТУ

В случае варианта с одноступенчатой турбиной с трехвечной ступенью скорости влияние на удельную стоимость практически не наблюдается (0,82 %). Наименьшей удельной стоимостью в размере 383 \$/кВт обладает паросиловая

надстройка для мультиблочной ТЭС с серийной турбиной Т-30/2,9 и в этом случае имеет место сокращение удельных капиталовложений на 1,97 %, что можно связать с высокой единичной мощностью надстраиваемого турбоагрегата и его низкой удельной стоимостью.

Себестоимость электроэнергии зависит от годовых издержек на топливо на отпущенную электроэнергию и постоянных годовых затрат, в которые входят амортизационные отчисления, ремонтные издержки, затраты на эксплуатационный и ремонтный персонал и прочие расходы:

$$S^{ЭЭ} = \frac{(I_T^{Э} + I_{AM} + \theta_{ЗП} + I_{РЕМ} + I_{ПРОЧ})}{\mathcal{E}_{ош}}. \quad (20)$$

По результатам расчетов можно видеть (Рисунок 9), что наименьшая себестоимость электроэнергии (1,65 руб/кВт·ч) у мультиблочной ТЭС. Это можно объяснить более высокой эффективностью использования топлива и наименьшими капиталовложениями. Наибольшая себестоимость электроэнергии (1,92 руб/кВт·ч) у комбинированной ТЭС с фреоновой ПТУ.

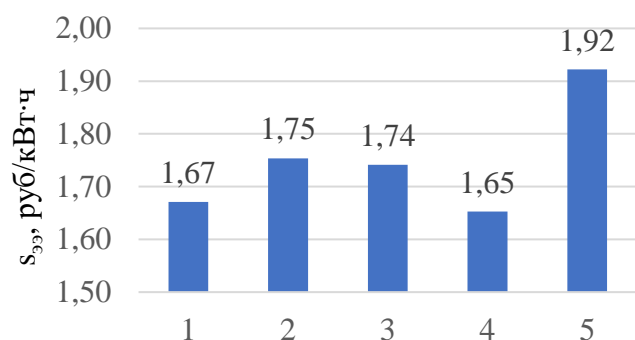


Рисунок 9 – Себестоимость электроэнергии по вариантам:

- 1 – с многоступенчатой ПТУ;
- 2 – с одноступенчатой ПТУ с трехвечной ступенью скорости;
- 3 – с паровинтовой машиной;
- 4 – мультиблочная с одной ПТУ;
- 5 – с фреоновой ПТУ

Эффективность инвестиций оценена по дисконтированному сроку окупаемости, Рисунок 10. При этом принимается, что строительство электростанции происходит в первый год, ее функционирование начинается со второго года, а ставка дисконтирования принята в размере 15 %.

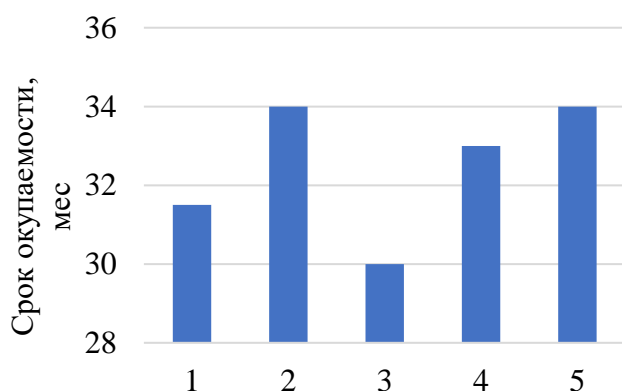


Рисунок 10 – Дисконтированный срок окупаемости комбинированных энергоустановок:

- 1 – с многоступенчатой ПТУ;
- 2 – с одноступенчатой ПТУ с трехвечной ступенью скорости;
- 3 – с паровинтовой машиной;
- 4 – мультиблочная с одной ПТУ;
- 5 – с фреоновой ПТУ

Можно видеть, что на окупаемость все предлагаемые варианты энергоустановок выходят в течение первых двух лет функционирования или в течение трех лет с начала строительства.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Разработана методика определения предельных значений эффективности энергетических установок на основе сочетания циклов Отто и Ренкина на основе уравнений энергетических балансов. Показано, что предельная теоретическая эффективность подобных комбинированных установок находится на уровне 64 %, что сравнимо с показателями перспективных ПГУ на основе поколения газовых турбин с пароохлаждаемыми лопатками.

2) Разработаны методические положения по определению энергетических, расходных и конструктивных характеристик котла-утилизатора и паровых турбин лопаточного типа сверхмалой мощности. При этом показано, что при реализации моноблока комбинированной установки на базе ГПУ Jenbacher JMS 620 GS котел-утилизатор может обеспечить до 2 т/ч пара с параметрами 40 бар и 400 °С. Габаритные размеры КУ составят 9,2 x 4,2 x 8,9 м. Паровая турбина лопаточного типа в вариантах многоступенчатом и одноступенчатом имеет габариты, не превышающие 2,5 м. Оба варианта способны работать при снижении нагрузки на ГПУ до 80 % с потерей мощности. Одноступенчатая трехвенечная турбина имеет η_{oi} в 1,25 раза ниже по сравнению с многоступенчатой. Все варианты могут быть выполнены в блочно-модульной компоновке.

3) Разработаны пять вариантов комбинированных энергоустановок на базе газопоршневых установок и паросиловых надстроек.

4) Определено, как влияет на эффективность внедрение каждого из вариантов установки. Максимальная прибавка КПД в размере 7,3 % была обеспечена паросиловой установкой на базе одноступенчатой паровой турбины с трехвенечной ступенью скорости, наименьший эффект (1,5 %) получен от внедрения паросиловой надстройки на базе органического цикла Ренкина с фреоном R600 в качестве рабочего тела.

5) Удельные расходы условного топлива на отпускаемую электроэнергию составили от 231 г у т/кВт·ч до 304 г у т/кВт·ч в зависимости от варианта установки. Наилучший показатель у мультиблочной комбинированной ТЭС, наихудший – у комбинированной установки на низкокипящем рабочем теле. При этом наилучший эффект по снижению расхода топлива достигается при внедрении паросиловой надстройки на базе одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости и составил 45,9 г у т/кВт·ч.

6) Капиталовложения в энергоустановки составили от 45,6 млн. руб. для варианта с одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости до 156,7 млн. руб. для мультиблочного решения с одной ПТУ. Удельные капиталовложения составили от 32,3 тыс. руб/кВт до 36,8 тыс. руб/кВт. Удельная стоимость паросиловой надстройки составила от 28,7 тыс. руб/кВт для мультиблочной комбинированной ТЭС до 173,3 тыс. руб/кВт для комбинированной установки с фреоновой ПТУ. При этом снижение удельных капиталовложений при внедрении паросиловой надстройки наблюдается только для варианта мультиблочной ТЭС и составило 1,97 %. Себестоимость электроэнергии составила от 1,65 руб/кВт до 1,92 руб/кВт в зависимости от варианта установки. Наилучший показатель у мультиблочной комбинированной ТЭС, наихудший – у комбинированной

установки на низкокипящем рабочем теле. Окупаемость установок оценена в размере от 30 до 34 месяцев. Наилучший результат принадлежит варианту комбинированной ТЭС с паровинтовой машиной, наихудший – вариантам с одноступенчатой ПТУ с трехвенечной ступенью скорости и с фреоновой турбиной.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В научных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ):

1. **Марасанов, Н. В.** Комбинированная мини-ТЭС на базе газопоршневой установки и паровой турбины = Combined mini-TRP based on gas piston installation and steam turbine / П. А. Щинников, Н. В. Марасанов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – №11/12. – С. 10-17.

2. **Марасанов, Н. В.** Методические особенности исследования энергетической эффективности комбинированной мини-ТЭС на базе газопоршневой установки и паровой турбины / П. А. Щинников, Н. В. Марасанов // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т.24., № 4. – С. 651-654.

В сборниках материалов и трудов конференций всероссийского и международного уровня:

3. **Марасанов, Н. В.** Новая технология на основе двигателя внутреннего сгорания и паровой турбины / П. А. Щинников, А. А. Ловцов, Н. В. Марасанов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 304-307.

4. **Marasnov, N. V.** Mini Thermal Power plant based on gas piston unit and steam turbine / N. V. Marasnov, P. A. Schinnikov // Science in Progress : тезисы всероссийской научно-практической конференции магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 20 октября 2016 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – Р. 133-134.

5. **Марасанов, Н. В.** Особенности исследования энергетической эффективности мини-ТЭС на базе газопоршневой установки и паровой турбины / Н. В. Марасанов, П. А. Щинников // Наука. Технологии. инновации : Сборник научных трудов в 9 частях, Новосибирск, 05-09 декабря 2016 года / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 261-263.

6. **Марасанов, Н. В.** Мини-ТЭС на базе газопоршневой установки и паровой турбины / Н. В. Марасанов, П. А. Щинников // Наука. Технологии. инновации : Сборник научных трудов в 9 частях, Новосибирск, 05–09 декабря 2016 года / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 263-265.

7. **Марасанов, Н. В.** Мини-ТЭС бинарного цикла на базе газопоршневой установки и паровой турбины / Н. В. Марасанов, П. А. Щинников // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы IV российской молодежной научной школы-конференции: в 2 томах, Томск,

01–03 ноября 2016 года / Томский политехнический университет. – Томск: ООО «ЦРУ», 2016. – С. 123-126.

8. **Марасанов, Н. В.** Комбинирование циклов Отто и Ренкина в одной энергетической установке / П. А. Щинников, Н. В. Марасанов // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса : сб. науч. тр. Вып. 8. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы 13 междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 1-3 нояб. 2016 г. – Саратов, 2016. – С.154-157.

9. **Марасанов, Н. В.** Повышение эффективности мини-ТЭС на базе газопоршневой установки / П. А. Щинников, Н. В. Марасанов // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности : Седьмая международная научно-техническая конференция, Ульяновск, 21-22 апреля 2017 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 160-162.

10. **Марасанов, Н. В.** Повышение электрической эффективности энергоустановки при сочетании циклов Отто и Ренкина / Н. В. Марасанов // Наука. Технологии. инновации : Сборник научных трудов: в 10 частях, Новосибирск, 04-08 декабря 2017 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2017. – С. 235-238.

11. **Марасанов, Н. В.** Оптимизация параметров энергетической установки на основе циклов Отто и Ренкина / Н. В. Марасанов // Семинар вузов по теплофизике и энергетике : Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–23 октября 2019 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. – С. 238-239.

В других изданиях:

12. **Марасанов, Н. В.** Энергетическая эффективность газопоршневой установки с паротурбинным утилизационным контуром / П. А. Щинников, Н. В. Марасанов // Энергетика и теплотехника : сборник научных трудов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. – С. 118-128.

13. **Марасанов, Н. В.** Малая и нетрадиционная генерация / С. Л. Елистратов, П. А. Щинников, Д. С. Синельников [и др.] // Комплексные исследования энергоблоков электростанций и энергоустановок : монография. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. – С. 385-442.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
Заказ Р-00850. Подписано в печать 07.04.2022 г.