

На правах рукописи



Туболев Александр Анатольевич

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СХЕМ ГАЗОПАРОВЫХ
УСТАНОВОК**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и
агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

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

Научный руководитель:

Галашов Николай Никитович

кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Томского политехнического университета

Официальные оппоненты:

Богомолов Александр Романович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра теплоэнергетики, заведующий кафедрой

Клер Александр Матвеевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел теплосиловых систем, заведующий отделом

Защита состоится «22» сентября 2022 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.20 на базе Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7 (уч. корпус № 8, аудитория 217).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте <https://dis.tpu.ru>.

Автореферат разослан «19» августа 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.20
К.ф.-м.н.

Высокоморная Ольга Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из перспективных технологических направлений развития российской энергетики является создание отечественных газотурбинных установок (ГТУ) большой и средней мощности и высокоэффективных парогазовых установок (ПГУ) на их основе. Важным следствием развития энергоэффективных технологий является снижение роста эмиссии вредных выбросов энергетических предприятий в окружающую среду. В число мер, которые способствуют решению данных задач, входит развитие научных исследований в этой области.

Парогазовые энергетические установки, в основе работы которых лежат газотурбинные установки с энергетическим впрыском водяного пара в камеру сгорания, принято называть газопаровыми установками (ГПУ). Пар впрыскивается в камеру сгорания, смешивается с продуктами сгорания и уже парогазовая смесь совершает работу. Ввод в цикл дополнительного рабочего тела позволяет снизить затраты мощности на компрессор и повысить значение удельной полезной мощности установки. Известно, что концентрация оксидов азота (NO_x) экспоненциально увеличивается с ростом температуры в зоне горения. Впрыск пара позволяет снизить эту температуру, вследствие чего сокращается содержание NO_x в уходящих газах.

Основным недостатком ГПУ с впрыском пара является потеря с уходящими газами воды, введенной при впрыске и полученной при окислении водорода топлива, и повышенное тепловое и паровое загрязнение окружающей среды. Внедрение в тепловую схему газопаровой установки теплоутилизатора конденсационного типа позволяет сохранить воду, затраченную на впрыск, и полезно использовать теплоту уходящих газов за счет их охлаждения и конденсации пара. Переданная в теплоутилизаторе от газов к воде теплота может быть использована в системе теплоснабжения. Из-за низкой температуры воды требуется применение теплонасосной установки, которая кроме обеспечения необходимой в системе теплоснабжения температуры воды в прямой сети позволит снизить температуру охлаждающей воды на входе теплоутилизатора и этим снизить температуру уходящих газов.

Объект исследования – комбинированные газопаровые установки с глубокой утилизацией теплоты и влаги из уходящих газов на базе газотурбинных установок с экологическим и энергетическим впрыском пара в камеру сгорания.

Предмет исследования – схемы газопаровых установок с глубокой утилизацией теплоты и влаги из уходящих газов и отпуском электроэнергии и теплоты в системы энергоснабжения.

Целью работы является параметрический анализ тепловых схем газопаровых установок с глубокой утилизацией теплоты и влаги из уходящих газов и отпуском электроэнергии и теплоты в системы энергоснабжения.

Задачи исследования:

1. Разработать принципиальную тепловую схему газопаровой установки с глубокой утилизацией теплоты и влаги из уходящих газов.
2. Разработать методику и алгоритм расчета энергетических характеристик газопаровой установки с возможностью изменения состава оборудования тепловой схемы.
3. Провести параметрические исследования ГПУ простой схемы с целью определения путей оптимизации рабочих параметров.
4. Провести параметрические исследования тепловой схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией теплоты и влаги из уходящих газов и отпуском электроэнергии и теплоты в системы энергоснабжения.

Научная новизна:

1. Разработана новая тепловая схема газопаровой установки с впрыском пара в камеру сгорания для снижения образования оксидов азота и увеличения мощности турбин, в которой для снижения потери теплоты с уходящими газами и сокращения выброса влаги в атмосферу, введен конденсационный теплоутилизатор с активной насадкой и тепловой насос.
2. Разработана новая методика и алгоритм расчета тепловых схем ГПУ, отличающаяся возможностью проведения анализа вариантов схем с различным составом оборудования.
3. Проведены параметрические исследования схемы ГПУ с получением пара в котле-утилизаторе и впрыском его в камеру сгорания и газовую турбину. Определен диапазон допустимых режимов работы ГПУ с учетом ограничений получения пара в котле-утилизаторе.
4. Впервые определены режимы работы ГПУ, при которых возможна компенсация затрат воды на впрыск в камеру сгорания за счет конденсата, получаемого в конденсационном теплоутилизаторе. В режимах с температурой газов на входе в газовую турбину от 1200°C до 1700°C избыток конденсата относительно впрыска составляет от 1 до 12%, увеличиваясь с ростом температуры.
5. Проведена оценка эффективности работы ГПУ утилизационного типа в системе энергоснабжения с отпуском электроэнергии и теплоты. С точки зрения максимального полезного отпуска электроэнергии наиболее эффективный график тепловой сети 105/70°C.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследований доведены до практического применения в виде зарегистрированных программ для ЭВМ. Результаты численных исследований эффективности работы ГПУ с конденсационным теплоутилизатором с активной насадкой и теплонасосной установкой могут быть использованы при проектировании систем автономного и централизованного энергоснабжения. Программные продукты, реализующие методику расчета циклов газотурбинной установки простой схемы, с регенерацией, с промежуточным охлаждением и с регенерацией и промежуточным охлаждением,

предназначенные для определения характеристик ГТУ при изменении входных параметров, могут использоваться научными, промышленными и проектными организациями.

Результаты диссертационных исследований используются в Научно-образовательном центре И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета при чтении курсов лекций, проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Паротурбинные и парогазовые установки», «Газовые турбины и компрессоры электростанций», «Тепловые и атомные электрические станции», «Парогазовые и газотурбинные технологии», «Эксергетический анализ технологий преобразования энергии», а также при выполнении научно-исследовательской работы студентами и выпускных квалификационных работ в соответствии с действующими программами по специальностям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Использование результатов работы подтверждается актами внедрения.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы теории термодинамики, тепломассопереноса и энергобалансов. Верификация осуществлялась сопоставлением расчетных результатов с данными, представленными в литературных источниках. Для автоматизации расчетных алгоритмов применялась программа MS Excel. Параметры воздуха, топлива, продуктов сгорания, воды и водяного пара определялись по функциям программы «REFPROP 8».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработанная тепловая схема ГПУ с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов с применением конденсационного теплоутилизатора с активной насадкой и теплонасосной установки.
2. Методика, алгоритм и программа термодинамического расчета тепловых схем ГПУ с различным составом оборудования, разработанная с использованием систем уравнений материальных и энергетических балансов, и вычисления термодинамических свойств веществ на ЭВМ.
3. Диапазон допустимых режимов работы ГПУ при впрыске пара в камеру сгорания и газовую турбину с учетом ограничений получения его в котле-утилизаторе.
4. Диапазон режимов работы ГПУ, при которых возможна компенсация затрат воды на впрыск в камеру сгорания за счет конденсата, получаемого в конденсационном теплоутилизаторе.
5. Результаты параметрических исследований эффективности работы ГПУ без глубокой утилизации теплоты и с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов в условиях системы энергоснабжения с отпуском электроэнергии и теплоты.

Личный вклад автора. Все результаты исследований, выносимые на защиту и изложенные в тексте работы, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автором совместно с научным руководителем проведен анализ и обсуждение полученных результатов.

Достоверность полученных результатов. Расчеты проведены с применением алгоритмов, в основу которых заложены уравнения материальных и тепловых балансов, тепло- и массопередачи в компрессорах, газовых и паровых турбинах и прочих теплообменных аппаратах. Расчеты проведены итерационными методами. Погрешность вычислений по программам и на основе ручного расчета не превышает 2–5 %.

Апробация работы. Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, в период с 2015 по 2022 гг. представлены и обсуждены на следующих научных конференциях, проводимых на базе Томского политехнического университета: Региональная научно-практическая конференция «Теплофизические основы энергетических технологий», Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения теплового режима энергонасыщенного технического и технологического оборудования», Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». Также результаты исследований доложены на 8-ой Международной молодежной научной конференции «Поколение будущего – 2019: взгляд молодых ученых», проводимой на базе Юго-Западного государственного университета (г. Курск).

Получены свидетельства Российской Федерации об официальной регистрации программ для ЭВМ: «Расчет цикла простой газотурбинной установки» №2016660768 от 21 сентября 2016 г.; «Расчет цикла газотурбинной установки с регенерацией» №2016660769 от 21 сентября 2016 г.; «Расчет цикла газотурбинной установки с промежуточным охлаждением» №2016660767 от 21 сентября 2016 г.; «Расчет цикла газотурбинной установки с регенерацией и промежуточным охлаждением» №2016660766 от 21 сентября 2016 г.; «Расчет схем газопаровых установок с утилизацией теплоты уходящих газов» №2022660396 от 14 июня 2022 г.

Публикации по теме исследования. Ключевые результаты и выводы исследований опубликованы в 19 работах: 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 11 публикаций в изданиях, индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus». Получены 5 свидетельств Российской Федерации об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает в себя введение, 5 глав, заключение и список использованных литературных источников (146 наименований). Объем работы в печатном виде составляет: 196 страниц (57 рисунков, 7 таблиц, 14 приложений).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность диссертации, дана краткая характеристика исследуемых проблем, сформулированы цели и задачи, отражена теоретическая и практическая значимость, научная новизна полученных результатов.

В первой главе проведен анализ состояния вопросов повышения эффективности парогазовых установок, изучены ключевые публикации по теме исследования. Определено, что в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в области решения задач повышения тепловой экономичности и удельной мощности комбинированных установок является впрыск водяного пара в тракт газовой турбины. Впрыск пара позволяет повысить мощность и коэффициент полезного действия установки, сократить вредные выбросы в атмосферу, повысить надежность установки за счет снижения температуры газов в камере сгорания. Проанализированы основные методические подходы к определению технико-экономических показателей парогазовых установок. Определены ключевые моменты, влияющие на возможность совершенствования методики расчета парогазовой установки, имеющей в своем составе газовую турбину с впрыском пара в камеру сгорания.

Во второй главе проведена разработка принципиальной тепловой схемы ГПУ с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов с применением конденсационного теплоутилизатора с активной насадкой (КТАН) и теплонасосной установки (ТНУ).

На рисунке 1 представлена исходная принципиальная тепловая схема ГПУ, положенная в основу разработанной ГПУ с глубокой утилизацией теплоты. Цикл рабочих тел ГПУ простой схемы (без глубокой утилизации теплоты) в T-S диаграмме приведен на рисунке 2. Номера точек на линиях циклов соответствуют номерам на схеме (рисунк 1).

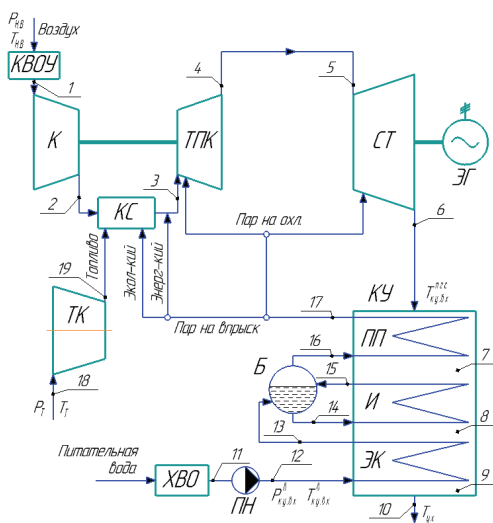


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема ГПУ простой схемы (без глубокой утилизации теплоты уходящих газов)

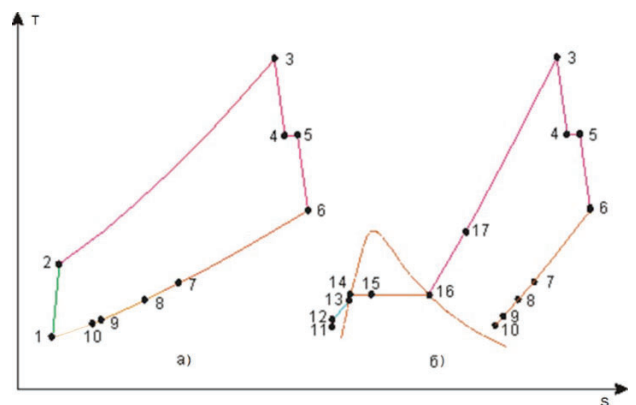


Рисунок 2 – T-S диаграмма цикла ГПУ: а) – цикл сухих продуктов сгорания; б) – цикл воды и водяного пара

Работа ГПУ организована следующим образом. В комплексной воздухоочистительной установке (КВОУ) атмосферный воздух очищается от пыли, после чего в адиабатном процессе 1–2 сжимается в воздушном компрессоре (К) до давления в камере сгорания (КС). На входе в КС воздух смешивается с паром экологического впрыска. Также в камеру сгорания топливным компрессором (ТК) в адиабатном процессе сжатия 18–19 подается природный газ, а из котла-утилизатора (КУ) пар энергетического впрыска. При горении топлива в КС в изобарном процессе 2–3 подводится теплота, при этом продукты сгорания топлива нагреваются до высокой температуры T_3 перед турбиной привода компрессора (ТПК). В ТПК в адиабатном процессе 3–4 продукты сгорания совершают работу, вращая ротор компрессора, и с температурой T_4 через выхлопной патрубков поступают в состоянии 5 в силовую турбину (СТ), в которой в адиабатном процессе 5–6 расширяются и совершают работу, вращая ротор электрогенератора (ЭГ). Из СТ продукты сгорания с температурой T_6 поступают в котел-утилизатор, в котором проходят через пароперегреватель (ПП), испаритель (И), экономайзер (ЭК), после чего с температурой уходящих газов $T_{ух}=T_{10}$ отводятся через дымовую трубу в атмосферу. В результате передачи теплоты в КУ температура продуктов сгорания в изобарном процессе снижается до состояний 7 за ПП, 8 за И и 9 за ЭК. Питательная вода после очистки в ХВО питательным насосом (ПН) в адиабатном процессе 11–12 сжимается до давления $P_{пн.вых}$ и в изобарном процессе нагревается в экономайзере (ЭК) до состояния 13 с недогревом до состояния насыщения на $4-6^{\circ}\text{C}$, после чего поступают в барабан (Б). В испарительном контуре (И) кипящая вода от состояния 14 нагревается до состояния 15 со степенью сухости 20% и поступает в Б, где из воды образуется сухой насыщенный пар в состоянии 16, который затем перегревается в пароперегревателе (ПП) до состояния 17 и идет на экологический и энергетический впрыски и охлаждение турбины привода компрессора (ТПК) и силовой турбины (СТ).

На рисунке 3 показана Т-Q диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе.

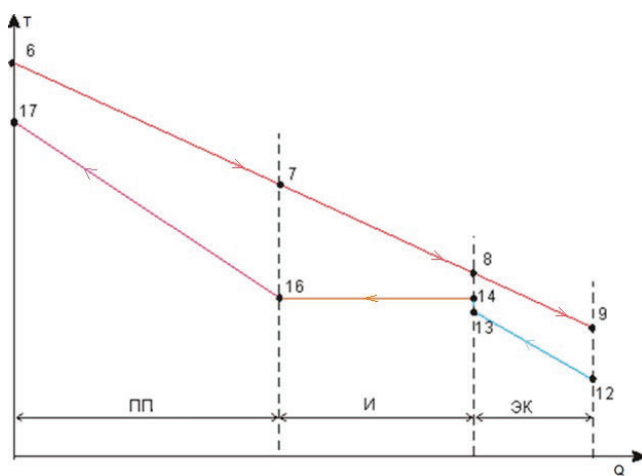
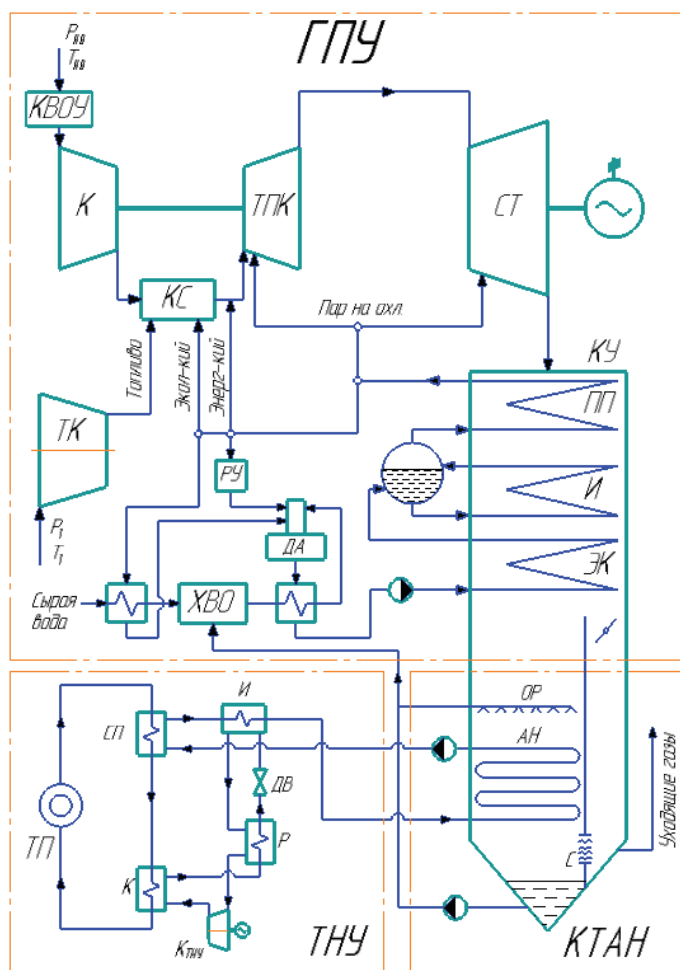


Рисунок 3 – Т-Q диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе

Разработанная принципиальная тепловая схема ГПУ с глубокой утилизацией теплоты (рисунок 4) представляет собой доработанную схему простой ГПУ (рисунок 1) путем внедрения после котла-утилизатора конденсационного теплоутилизатора с активной насадкой и теплонасосной установки. Принцип работы простой ГПУ описан ранее. В новой схеме после экономайзера уходящие газы с помощью распределительного клапана разделяются на

два потока. Основной поток направляется в КТАН, где сначала протекают процессы тепло- и массообмена между уходящими газами и орошающей жидкостью, а затем процесс теплообмена между орошающей водой и водой, проходящей в трубном пучке активной насадки. Теоретическим пределом нагрева воды в активной насадке является температура мокрого термометра смеси газов. Второй поток, пройдя через байпас, смешивается с газами после КТАНа для их подогрева и исключения конденсации влаги в газоходах и дымовой трубе. Сконденсированная в КТАНе из потока уходящих газов влага стекает в сборник конденсата. Часть конденсата возвращается на спринклерную систему орошения, а оставшаяся часть отводится на химводоочистку, после которой очищается от агрессивных газов в деаэрационной установке и питательным насосом подается в котел-утилизатор. Нагрев сетевой воды осуществляется в двух ступенях. Первая ступень – водо-водяной сетевой подогреватель, в котором нагревается водой, проходящей через активную насадку КТАНа, а вторая – конденсатор теплового насоса. Охлаждение воды в испарителе теплового насоса перед активной насадкой позволяет обеспечить низкую температуру воды на входе в активную насадку, что снижает температуру конденсации влаги из уходящих газов.



ГПУ:

К – компрессор; КС – камера сгорания; ТК – топливный компрессор; КВОУ – комплексное воздухоочистительное устройство; ТПК – турбина приводная компрессора; СТ – силовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ХВО – химводоочистка; ЭК – экономайзер; И – испаритель; ПП – пароперегреватель; РУ – редуцирующая установка; ДА – атмосферный деаэрактор.

КТАН:

ОР – ороситель; АН – активная насадка; С – сепаратор.

ТНУ:

И – испаритель; К – конденсатор; СП – сетевой подогреватель; $K_{\text{ТНУ}}$ – компрессор ТНУ; Р – регенератор; ДВ – дроссельный вентиль; ТП – тепловой потребитель.

Рисунок 4 – Принципиальная тепловая схема ГПУ с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов

В третьей главе разработана методика и алгоритм расчета тепловых схем ГПУ, отличающаяся возможностью проведения параметрического анализа вариантов схем с различным составом оборудования, реализованная в виде программного комплекса. Выполнена верификация разработанной методики и алгоритма.

В разделе 3.1 представлено описание разработанной методики, алгоритма работы программного комплекса и расчетных модулей элементов тепловой схемы ГПУ. За основу принята методика расчета ГТУ, описанная в работах МЭИ, которая переработана и преобразована под исследуемый тип ГТУ с впрыском пара в камеру сгорания для возможности ее реализации в виде программы для ЭВМ.

Программный комплекс создан в пакете Microsoft Excel с использованием языка программирования Visual Basic и позволяет проводить расчет и параметрический анализ вариантов тепловых схем газопаровых установок с различным составом оборудования. Программный комплекс включает в себя: модули расчета компрессорного оборудования (топливный компрессор, воздушный компрессор), модуль расчета газовой и паровой турбин, модуль расчета котла-утилизатора и другие модули отдельных элементов тепловой схемы, позволяя составлять из них различные варианты тепловых схем ГПУ с необходимым составом оборудования для параметрических исследований. На рисунке 5 показана обобщенная блок-схема алгоритма работы программного комплекса.

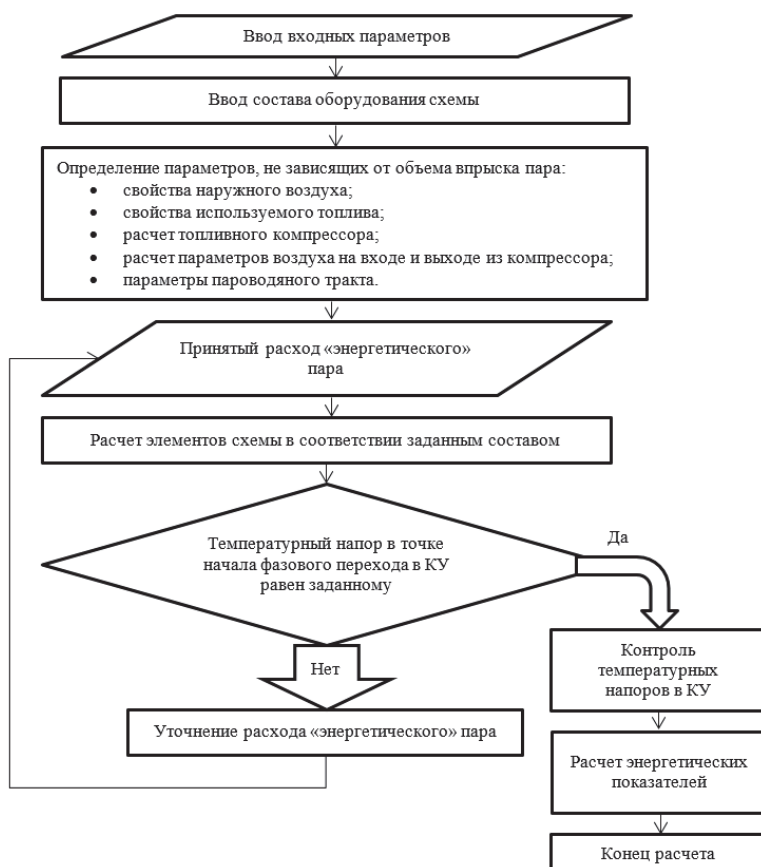


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расчета ГПУ

Расчет заключается в определении параметров в характерных точках цикла, коэффициента избытка воздуха, мощности компрессора и турбины, КПД цикла, удельных и секундных расходов воздуха, газопаровой смеси и воды на впрыск. Термодинамические свойства рабочих тел определяются по функциям программного продукта «REFPROP8». На рисунке 5 изображена блок-схема расчетного алгоритма.

Алгоритм расчета схемы ГПУ организован следующим образом: ввод исходных данных и состава

оборудования, входящего в установку; расчет данных, не зависящих от количества впрыскиваемого «энергетического» пара; расчет установки с принятым в первом приближении количеством впрыскиваемого пара (расчет повторяется с изменением расхода впрыска до выполнения условий равенства температурных напоров в КУ с заданными на основе рекомендаций, изложенных в технической литературе); при выполнении условий равенства температурных напоров производится запись результатов в массив данных. В соответствии с рекомендациями, изложенными в технической литературе, в поверхностях нагрева КУ должны быть обеспечены разности температур: Δt_{6-17} не ниже 30°C ; Δt_{8-14} не ниже 10°C ; Δt_{9-12} не ниже 20°C . На рисунке 4 показана $T-Q$ диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе: ПП – пароперегреватель, И – испаритель, ЭК – экономайзер, номера точек на линиях рисунка соответствуют номерам на рисунках 1, 2.

В разделе 3.2 выполнена верификация разработанного алгоритма (рисунок 5) расчета ГПУ путем сравнения полученных данных, с данными, представленными в литературных источниках для простой ГТУ (без впрыска) и данными по ГПУ (с впрыском в КС). Для простой ГТУ расчет проведен при условии отключения модулей, отвечающих за впрыск пара и расчет котла-утилизатора. Сравнительный анализ проводился по следующим параметрам: расчетный расход топлива, электрический КПД по отпуску электроэнергии, коэффициент избытка воздуха, расход газов через воздушный компрессор и газовую турбину, температура газов на выходе из воздушного компрессора и газовой турбины.

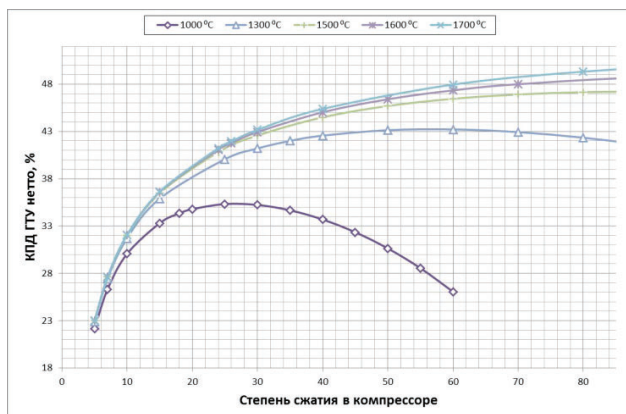
Результаты, полученные расчетным путем по разработанному алгоритму, для ГПУ с относительной погрешностью менее 3% совпадают с данными, представленными в литературе.

В четвертой главе проведен расчет и анализ влияния впрыска пара в камеру сгорания на энергетические показатели установки, представленной на рис. 1.

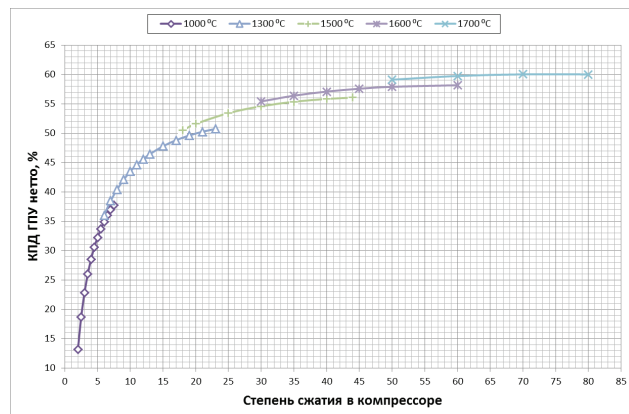
В разделе 4.1 проведен анализ влияния впрыска пара в камеру сгорания на энергетические показатели газопаровой установки. Получены основные зависимости характеристик работы простой газопаровой установки с впрыском пара в камеру сгорания и исходной газотурбинной установки (без впрыска пара) от входных параметров. На рисунке 6 представлены зависимости коэффициента полезного действия нетто от степени сжатия в компрессоре. Рассмотренный диапазон температур на входе в газовую турбину составляет $700 - 1700^{\circ}\text{C}$. Для наглядности представления полученных результатов на графики вынесены результаты с температурой газов перед турбиной от 1000°C .

При анализе полученных зависимостей (рисунок 6) видно, что энергетический впрыск пара в камеру сгорания определяет допустимые пределы изменения степени сжатия в компрессоре при определенном значении температуры газов на входе в газовую турбину. Это обусловлено принятыми (рекомендованными в технической литературе) значениями

температурных напоров в котле-утилизаторе. Степень сжатия в компрессоре, при которой достигается максимальный КПД установки, снижается относительно аналогичного варианта без впрыска.



а) КПД ГТУ нетто (без впрыска)



б) КПД ГПУ нетто

Рисунок 6 – зависимости КПД нетто от степени сжатия в компрессоре

На рисунке 7 представлена зависимость максимальных значений КПД нетто от температуры газов перед турбиной. Для варианта без впрыска пара максимальный КПД установки при заданной температуре перед ГТ соответствует оптимальному значению степени сжатия. Для варианта с впрыском – соответствует допустимой степени сжатия, по условию соблюдения принятых значений температурных напоров в котле утилизаторе.

При температуре газов на выходе КС до 900°C КПД ГПУ с впрыском пара ниже, чем у ГТУ без впрыска. С ростом температуры от 900°C до значений порядка 1300°C положительный эффект от впрыска пара быстро увеличивается от 0 до 7,5%. Дальнейшее увеличение температуры слабо влияет на прирост КПД, достигая при 1700°C 9%.

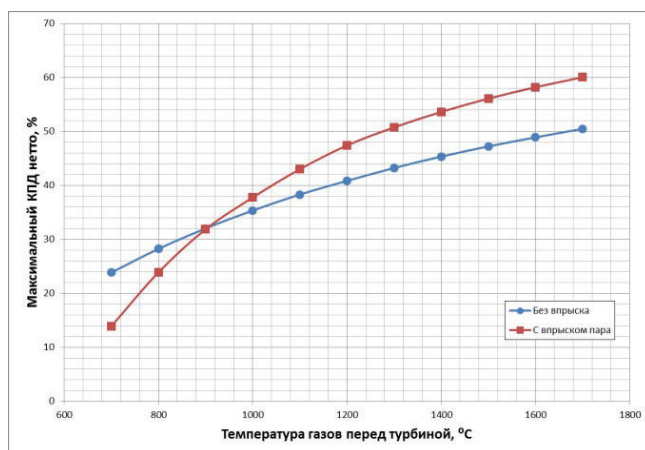
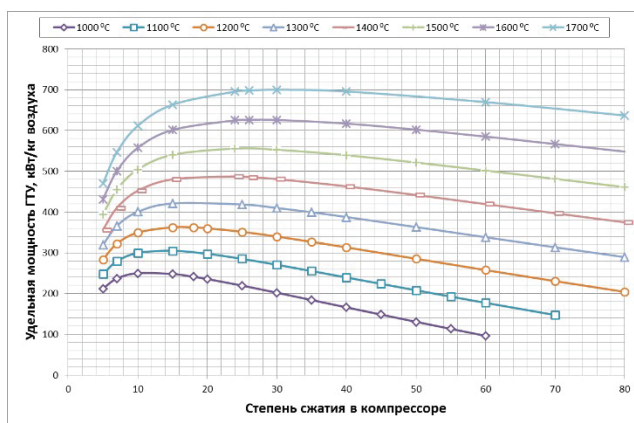


Рисунок 7 – Максимальный КПД нетто от температуры газов перед турбиной для ГПУ (с впрыском пара) и ГТУ (без впрыска)

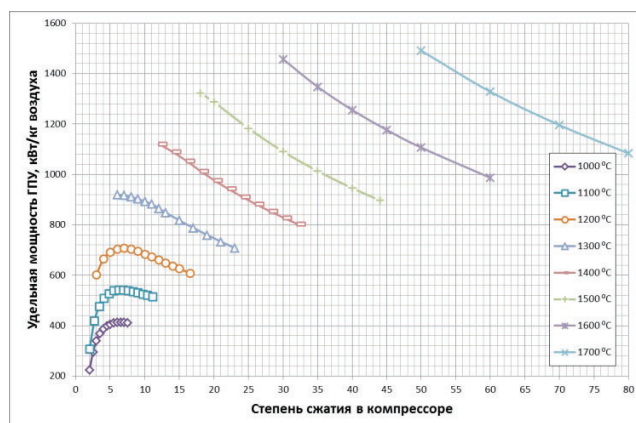
выше которой эффект от впрыска пара позволяет получать прирост КПД установки.

Положительный эффект впрыска пара на КПД обусловлен увеличением массового расхода рабочего тела и удельной теплоемкости потока при снижении затрат энергии на сжатие воздуха. Разность массового расхода рабочего тела в аналогичных вариантах с впрыском и без него снижается с ростом температуры газов перед турбиной, при этом относительная доля водяных паров возрастает. Этот факт объясняет наличие некоторого значения температуры газов перед турбиной (900°C на рисунке 7), выше которого эффект от впрыска пара позволяет получать прирост КПД установки.

Анализ зависимости удельной мощности газотурбинной установки на кг сжимаемого в компрессоре воздуха от степени сжатия и температуры газов перед турбиной (рисунок 8) позволяет сделать вывод, что впрыск пара: значительно повышает величину удельной мощности установки на 1 кг сжимаемого воздуха в компрессоре; вызывает более резкое изменение удельной мощности от степени сжатия в компрессоре; повышает прирост удельной мощности при увеличении температуры газов перед газовой турбиной.



а) ГТУ (без впрыска)



б) ГПУ

Рисунок 8 – Зависимость удельной мощности газотурбинной установки на кг сжимаемого в компрессоре воздуха от степени сжатия и температуры газов перед турбиной

Впрыск пара позволяет значительно снизить коэффициент избытка воздуха при тех же значениях температуры газов перед турбиной, что, соответственно, снижает затраты мощности на компрессор. При этом наблюдается более резкое изменение величины избыточного воздуха в зависимости от степени сжатия. Зависимость расхода энергетического пара носит обратный характер – снижается с ростом степени сжатия и температуры. Сильное снижение наблюдается в зоне низких значений степеней сжатия (Рисунок 9).

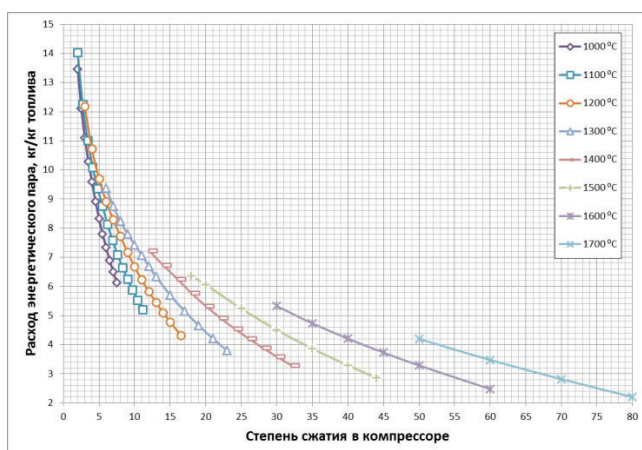
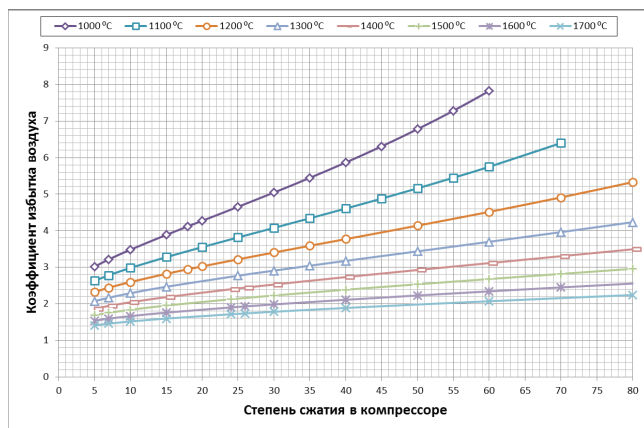


Рисунок 9 – Зависимость расхода энергетического пара ГПУ от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на входе в турбину

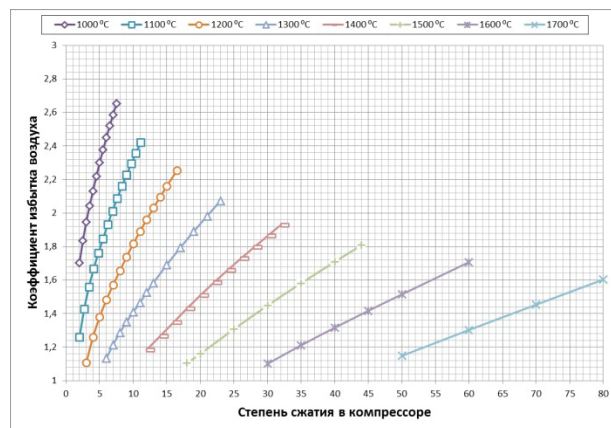
Характер изменения коэффициента избытка воздуха для установки с впрыском пара в камеру сгорания аналогичен, как и для установки без впрыска (рисунок 10): коэффициент избытка воздуха возрастает с увеличением степени сжатия в компрессоре и снижается с увеличением температуры газов перед турбиной.

Впрыск пара в камеру сгорания ГТУ позволяет значительно снизить температуру уходящих газов (Рисунок 11). Это обусловлено утилизацией теплоты с целью

нагрева и испарения воды для впрыска в котле-утилизаторе. Для ГПУ, в отличие от ГТУ без впрыска, характерен рост температуры уходящих газов с ростом степени сжатия в компрессоре. Максимальное охлаждение газов на выходе из котла-утилизатора ограничено заданной температурой питательной воды (в расчетах принималось рекомендуемое значение для ПГУ на природном газе 60°C) и величиной температурного напора в хвостовых поверхностях нагрева.

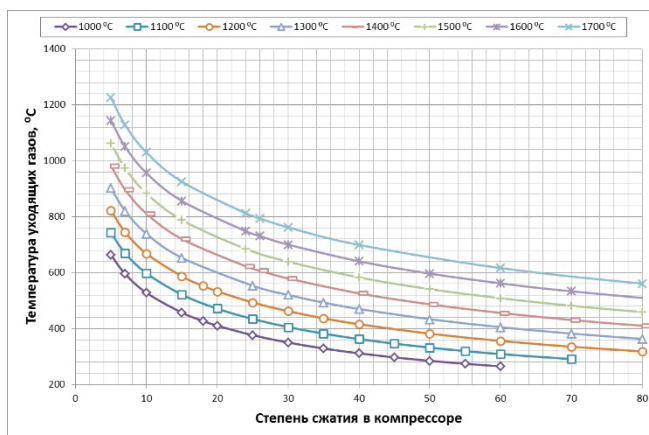


а) ГТУ (без впрыска)

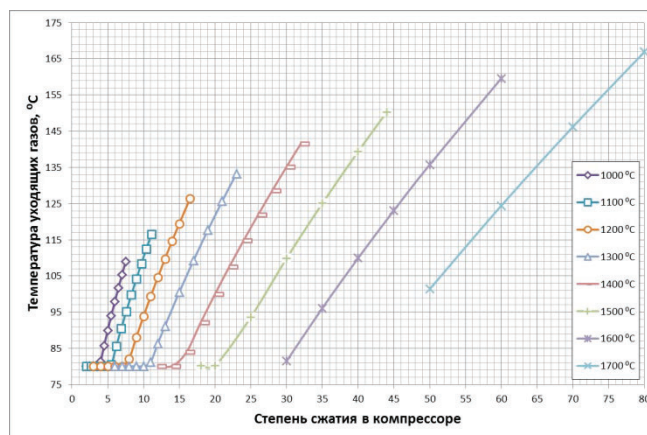


б) ГПУ

Рисунок 10 – Зависимость коэффициента избытка воздуха от степени сжатия в компрессоре.



а) ГТУ (без впрыска)

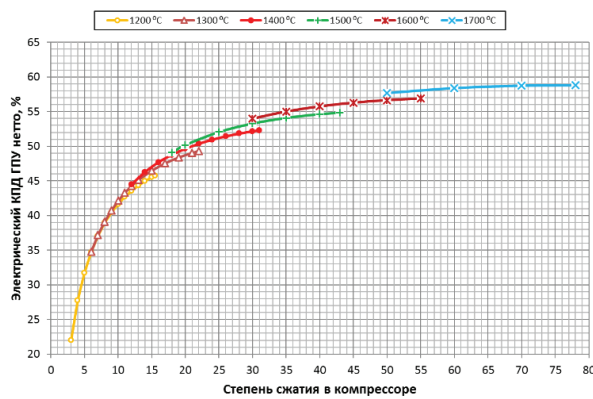


б) ГПУ

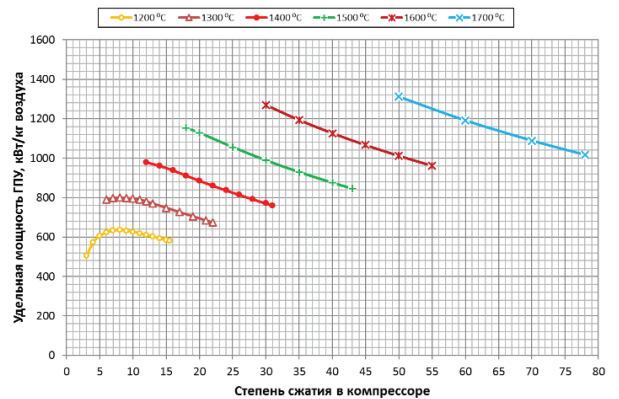
Рисунок 11 – Зависимость температуры уходящих газов от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на входе в турбину.

В разделе 4.2 выполнен анализ влияния на расчетные характеристики ГПУ температуры питательной воды на входе в котел-утилизатор. Исследования проведены с помощью разработанного программного комплекса путем подключения расчетного модуля деаэрационной установки в схему простой ГПУ (рисунок 1). Схема узла подпитки с деаэрацией питательной воды отображена на рисунке 4. В расчетах учитывается, что для исключения конденсации влаги на поверхности трубок экономайзера котла-утилизатора, рекомендуется поддерживать температуру питательной воды выше температуры точки росы уходящих газов, а пар, выработанный в котле-утилизаторе, кроме впрыска также подается на подогрев и деаэрацию

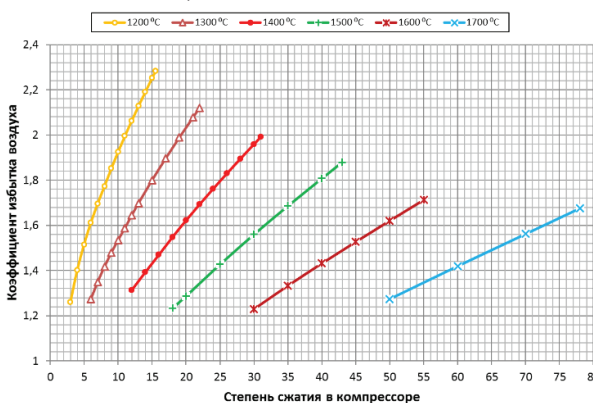
питательной воды. Температура точки росы газов определяется в зависимости от влагосодержания. Основные результаты расчетов приведены на рисунке 12.



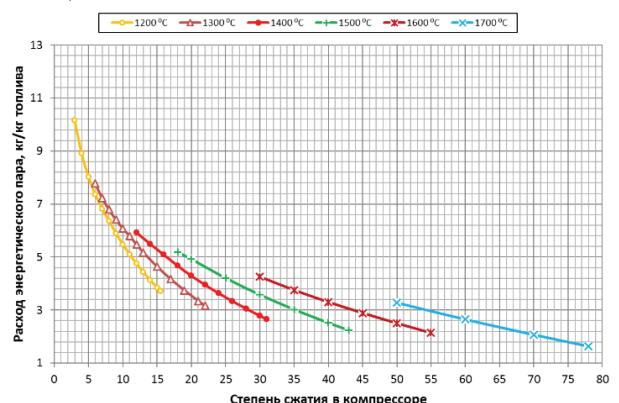
а) КПД ГПУ нетто



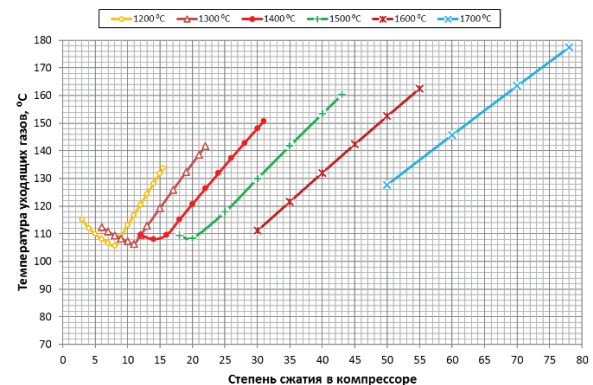
б) Удельная полезная мощность ГПУ



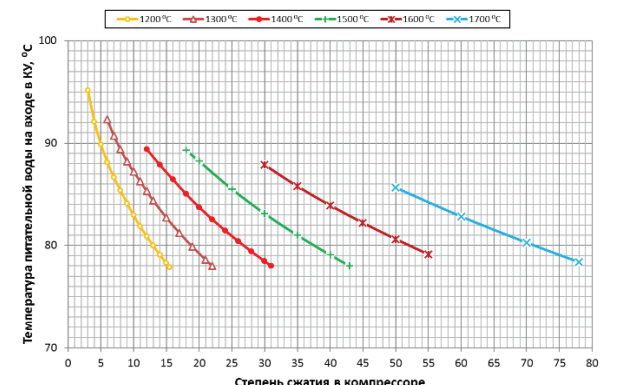
в) Коэффициент избытка воздуха



г) Энергетический впрыск пара



д) Температура уходящих газов КУ



е) Температура питательной воды

Рисунок 12 – Показатели работы ГПУ простой схемы с учетом температуры точки росы газовой смеси за экономайзером КУ в зависимости от степени сжатия в компрессоре и температуры газов за камерой сгорания

В ходе исследований установлено, что расчетное значение температуры питательной воды для ГПУ должно быть на 15 – 20°C (в зависимости от режима) выше рекомендованного для традиционных ПГУ на природном газе (60°C) по причине значительно более высокой влажности дымовых газов. Также анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что учет расхода пара на деаэрацию и определение температуры питательной воды с учетом влажности газов за экономайзером значительно влияют на расчетные значения характеристик работы ГПУ

и позволяет избежать завышенных расчетных значений КПД нетто, расхода энергетического пара и удельной полезной мощности.

С учетом, уточненных значений температуры питательной воды, получены показатели эффективности работы ГПУ простой схемы. В режимах с наивысшим КПД по отпуску электроэнергии (при максимально допустимых степенях сжатия в компрессоре и соблюдении заданных температурных напоров в КУ) величина энергетического впрыска снижается от 5,8 до 1,6 кг пара на 1 кг топлива с ростом температуры перед газовой турбиной от 1000 до 1700°C, соответственно. При этом КПД нетто по отпуску электроэнергии возрастает от 36 до 59%, удельная полезная мощность возрастает от 580 до 1020 кВт на 1 кг воздуха, сжимаемого в компрессоре.

В пятой главе выполнен параметрический анализ газопаровой установки с глубокой утилизацией теплоты и конденсацией паров воды из уходящих газов (рисунок 4).

Исследования проведены с помощью разработанного расчетного комплекса с подключением модуля расчета конденсационного теплоутилизатора с активной насадкой, модуля расчета теплового насоса и адаптированного модуля расчета подготовки подпиточной воды цикла с учетом возврата конденсата в цикл.

В разделе 5.1 проанализирована эффективность работы ТНУ в составе утилизационной ГПУ на различных рабочих веществах. Рассмотрены хладагенты: R22, R114, R134a, R141b, R142b, R152a. Наилучшие результаты из рассмотренных вариантов получены при использовании в качестве рабочего тела хладагента R141b.

В разделе 5.2 выполнен анализ показателей эффективности ГПУ с глубокой утилизацией теплоты.

Газопаровая установка в связке с КТАНом и тепловым насосом позволяет отпускать потребителю два вида продукции – электрическую и тепловую энергию. Для оценки топливной эффективности работы установок такого типа применяется коэффициент использования теплоты топлива:

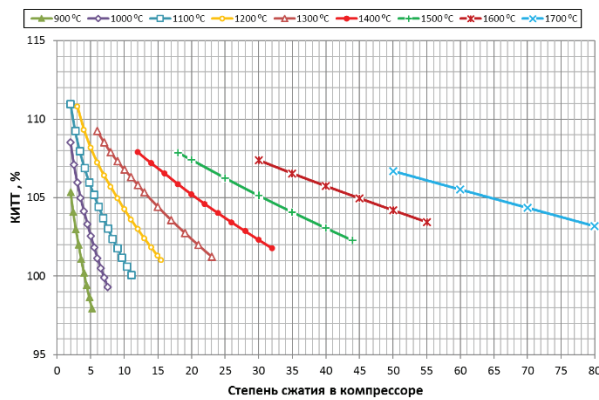
$$\text{КИТТ} = \frac{l_{\text{э}} + q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot 100\%,$$

где $l_{\text{э}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг п.г}}$ – удельная полезная работа, произведенная в цикле ГПУ, с учетом затраты энергии на компрессоры и насосы, $q_{\text{ТП}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг п.г}}$ – удельная теплота, отданная потребителю, $Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг п.г}}$ – низшая теплота сгорания топлива (природного газа).

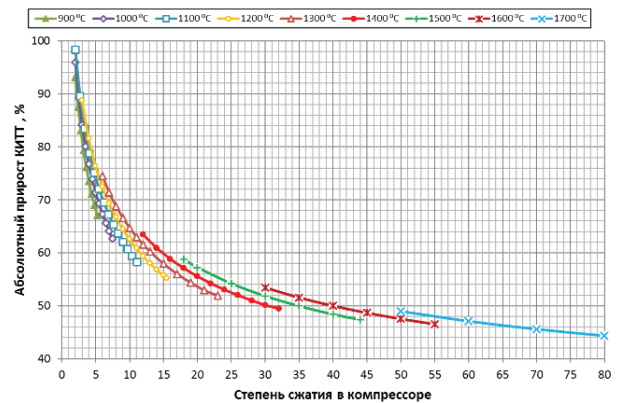
Изменение параметров потребителя тепловой энергии при прочих равных приводит к смещению баланса в сторону выработки тепловой или электрической энергии (перераспределению нагрузки между СП и конденсатором ТНУ) при неизменном значении

КИТТ и ряда других параметров, представленных ниже (рисунок 13). При этом оптимизация эффективности полезного отпуска электроэнергии требует дополнительного анализа.

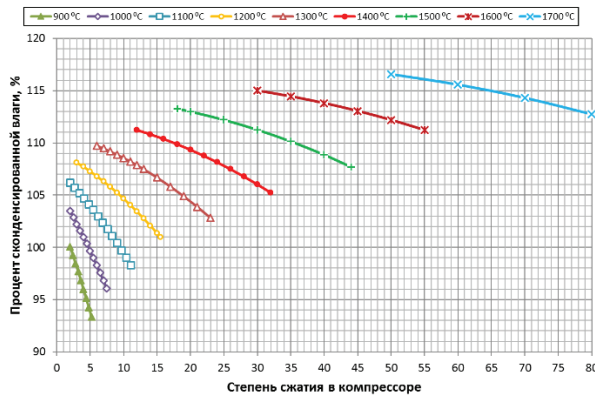
На основе результатов исследований, представленных в главе 4, определено, что максимум полезного отпуска электроэнергии для газопаровой установки характерен для режимов с максимально допустимыми (при соблюдении заданных минимальных температурных напоров в поверхностях нагрева КУ) значениями степени сжатия в воздушном компрессоре. В этих режимах покрыть необходимую потребность в воде на впрыск (рисунок 13в) возможно при температурах на входе в газовую турбину выше 1200°C, а избыток конденсата относительно впрыска составляет от 1 до 12%, увеличиваясь с ростом температуры за камерой сгорания.



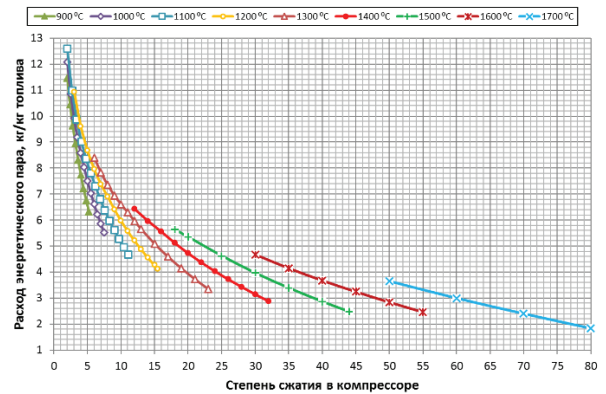
а) Коэффициент использования теплоты топлива



б) Прирост КИТТ ГПУ относительно установки без утилизации теплоты уходящих газов



в) Процент сконденсированной влаги относительно впрыска



г) Расход энергетического пара

Рисунок 13 – Показатели работы утилизационной ГПУ (не зависящие от параметров работы тепловой сети) в зависимости от степени сжатия в компрессоре и температуры газов перед турбиной

Максимум коэффициента использования теплоты характерен для режимов работы ГПУ при низких степенях сжатия в компрессоре (рисунок 13а). Характер изменения полученных зависимостей КИТТ обусловлен значительным влиянием величины впрыска (рисунок 13г).

Высокий впрыск позволяет получить более высокую теплопроизводительность активной насадки КТана за счет полезного использования скрытой теплоты конденсации водяных паров из газовой смеси. В режимах оптимальных с точки зрения полезного отпуска электроэнергии (максимальная степень сжатия) КИТТ изменяется от 98 до 103%, увеличиваясь с ростом температуры за КС от 1200 до 1700°C.

В разделе 5.3 выполнен анализ влияния температурного графика тепловой сети на показатели работы утилизационной ГПУ. Рассмотрены отопительные графики 105/70, 115/70, 130/70 и графики летнего горячего водоснабжения (ГВС) 70/49, 70/45 и 70/42 соответственно (при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления для г. Томска - 39°C). Для соблюдения условия сопоставимости вариантов при расчетах принято: температура воды на входе в активную насадку КТана неизменна для рассматриваемых режимов, нагрузка СП максимальна, нагрузка теплонасосной установки минимальна.

Установлено, что в режиме летнего горячего водоснабжения выбор графика тепловой сети имеет незначительное влияние на показатели работы установки. Электрический КПД по отпуску электроэнергии при рассмотренных режимах изменяется в пределах 0,5%. Удельный полезный отпуск тепловой энергии возрастает на 1 – 2% при графике теплосети 70/49°C (расчетный 105/70°C) относительно графика 70/42°C (расчетный 130/70°C).

В отопительном режиме температура обратной сетевой воды составляет 70°C для всех рассматриваемых графиков теплосети. Температура горячей воды на выходе из активной насадки КТана находится в пределах 65 – 75°C. Поэтому для дальнейшего повышения температуры прямой сети необходимо увеличивать тепловую нагрузку ТНУ. Рост нагрузки теплового насоса приводит к увеличению затрат энергии на сжатие хладагента и, как следствие, снижению полезного отпуска электроэнергии.

При изменении расчетной температуры прямой сети от 105 до 130 °C электрический КПД по отпуску электроэнергии снижается на величину от 10 до 15% в режимах с низким значением впрыска (высокая степень сжатия) и до 25% с высоким значением впрыска (низкая степень сжатия).

При расчетном графике теплосети 105/70°C в режимах работы установки со степенью сжатия 5 и ниже и температурой за КС 1200°C и ниже электрический КПД нетто принимает отрицательные значения. В этих режимах затраты энергии на привод компрессора ТНУ превышают полезную выработку электроэнергии. Увеличение расчетной температуры прямой сети приводит к еще большему росту нагрузки компрессора ТНУ и снижению электрического КПД установки.

Таким образом, с точки зрения полезного отпуска электроэнергии для утилизационной ГПУ наиболее эффективный график тепловой сети 105/70°C.

В разделе 5.4 выполнена оценка влияния температуры воды на входе в активную насадку КТАНа на показатели работы установки в целом. Рассмотренные режимы работы ГПУ соответствуют максимальным допустимым значениям степени сжатия при соответствующих температурах газов на входе в турбину. Параметры работы КТАНа по стороне газов при соответствующих режимах ГПУ неизменны.

Анализ показателей работы установки от температуры воды на входе в активную насадку и температуры газов за камерой сгорания проведен для температурного графика тепловой сети в режиме летнего ГВС 70/49°C (расчетный 105/70°C при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления -39°C).

Установлено, что с точки зрения повышения эффективности полезного отпуска электроэнергии для утилизационной ГПУ наиболее выгодно максимально завышать температуру воды на входе в активную насадку КТАНа. Так увеличение температуры воды на входе в активную насадку от 5 до 40°C в режимах работы ГПУ с максимально допустимыми значениями степени сжатия приводит к росту КПД нетто по отпуску электроэнергии от 10 до 23%. Максимальный эффект наблюдается при более низких температурах за камерой сгорания, так как в этих режимах впрыск пара больше и больше теплопроизводительность активной насадки КТАНа.

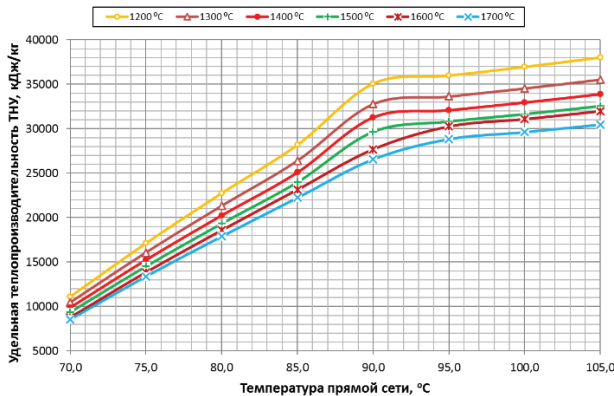
В разделе 5.5 проведен расчет утилизационной ГПУ в условиях изменения температуры наружного воздуха, и как следствие, изменения требуемых параметров теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе тепловой сети. Принятый расчетный график теплосети 105/70°C, расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления -39°C, г. Томск. Рассмотренный режим работы соответствует максимально допустимым значениям степени сжатия в компрессоре ГПУ при соответствующих температурах газов за камерой сгорания. Температура воды на входе в активную насадку принята максимально допустимой с учетом результатов исследований, представленных в разделе 4.3.

На рисунке 14 представлены показатели эффективности работы ГПУ с утилизацией теплоты уходящих газов в зависимости от температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе, в соответствии с заданным температурным графиком.

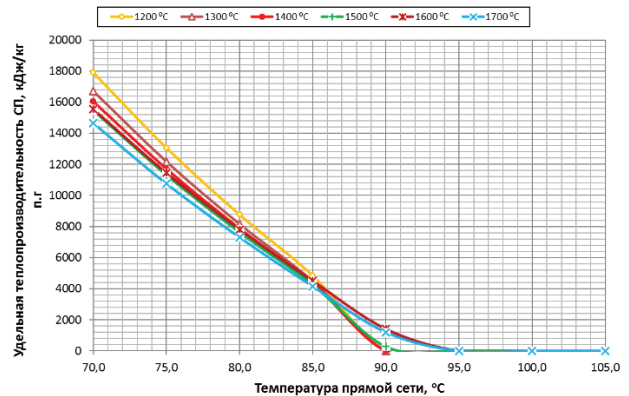
Определено, что режим, при котором температура прямой сети максимально близка к температуре воды на выходе из активной насадки (летнее ГВС), является наиболее выгодным с точки зрения полезного отпуска электроэнергии. Повышение температуры прямой сети (при снижении температуры наружного воздуха в отопительный сезон) приводит к росту затрат мощности на ТНУ и смещению баланса в сторону полезного отпуска теплоты потребителю.

Снижение КПД нетто ГПУ при переходе от летнего режима ГВС к максимальному отопительному составляет 18,1% при температуре за КС 1200°C и уменьшается до 10% при

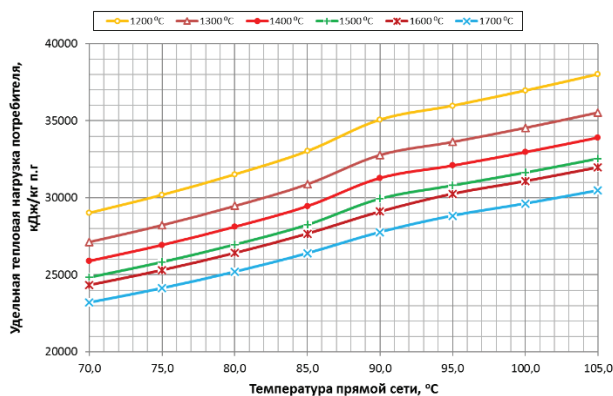
температуре за КС 1700°C. Удельный полезный отпуск тепловой энергии в режиме летнего ГВС и температуре за КС 1200°C составляет $29,1 \frac{\text{МДж}}{\text{кг п.г}}$ и снижается с повышением температуры за КС до 1700°C до $23,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг п.г}}$. Удельный полезный отпуск тепловой энергии в отопительном режиме и при температуре за КС 1200°C составляет $38,01 \frac{\text{МДж}}{\text{кг п.г}}$ и снижается с повышением температуры за КС до 1700°C до $30,47 \frac{\text{МДж}}{\text{кг п.г}}$.



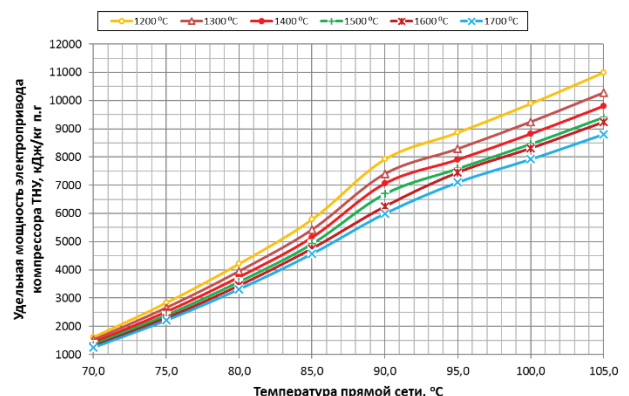
а) Удельная теплопроизводительность ТНУ



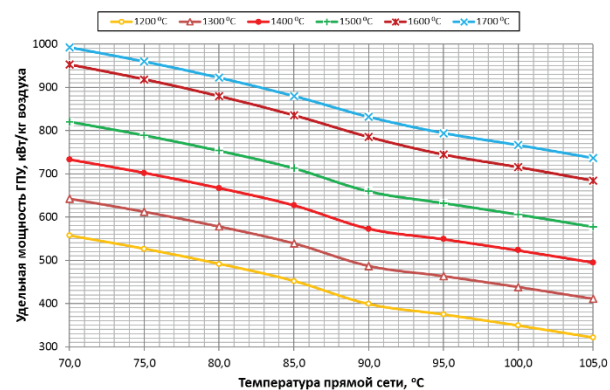
б) Удельная теплопроизводительность СП



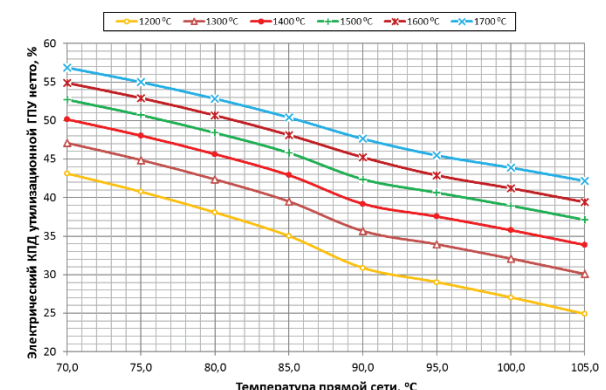
в) Удельная тепловая нагрузка потребителя



г) Удельная мощность электропривода компрессора ТНУ



д) Удельная полезная мощность ГПУ



е) КПД ГПУ по отпуску электроэнергии

Рисунок 14 – Показатели работы ГПУ утилизационного типа при работе в графике теплосети

105/70°C

Максимальное значение электрического КПД нетто, полученное при анализе работы утилизационной ГПУ, составляет 56,9% при КИТТ 103,2% с удельным полезным отпуском тепловой энергии $23,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг п.г}}$ и избытком массового расхода конденсата 12% относительно впрыска (график теплосети 70/49°C, температура за КС до 1700°C).

Основные результаты и выводы

1. Разработана принципиальная тепловая схема утилизационной ГПУ с конденсационным теплоутилизатором с активной насадкой и теплонасосной установкой, позволяющая компенсировать затраты исходной воды, затрачиваемой на впрыск, сократить тепловые выбросы и повысить потенциал тепловой энергии, отпускаемой потребителю.

2. Разработана методика и алгоритм расчета газопаровой установки, реализованная в виде программного комплекса, позволяющего проводить параметрический анализ тепловых схем газопаровых установок с различным составом оборудования в широком диапазоне исходных параметров.

3. Исследовано влияние впрыска пара в камеру сгорания на энергетические показатели газопаровой установки простой схемы (без глубокой утилизации теплоты уходящих газов), получены основные зависимости характеристик работы установки в диапазоне температур газов перед ГТ от 700 до 1700°C. При температуре газов перед ГТ до 900°C максимальный КПД нетто по отпуску электроэнергии для ГПУ с впрыском оказывается ниже, чем для ГТУ без впрыска. С ростом температуры от 900 до 1300°C положительный эффект от впрыска пара быстро увеличивается от 0 до 7,5%. Дальнейшее увеличение температуры слабо влияет на прирост КПД, который при 1700°C достигает 9%.

4. Выполнен анализ влияния на характеристики ГПУ температуры питательной воды на входе в КУ, зависящей от температуры точки росы уходящих газов за экономайзером. Установлено, что для исключения конденсации паров на поверхности трубок экономайзера, температура питательной воды на входе в котел-утилизатор должна быть не ниже 70 – 80°C в зависимости от режима работы ГПУ.

5. Проанализирована эффективность работы ТНУ в составе ГПУ с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов на различных рабочих веществах. Рассмотрены хладагенты: R22, R114, R134a, R141b, R142b, R152a. Наилучшие результаты из рассмотренных вариантов получены при использовании в качестве рабочего тела хладагента R141b.

6. Определено влияние температурного графика тепловой сети на показатели работы ГПУ с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов. Рассмотрены графики 105/70°C, 115/70°C, 130/70°C. Максимальный КПД нетто по отпуску электроэнергии получен при работе установки по температурному графику тепловой сети 105/70°C. В летнем режиме отпуска теплоты и

температуре рабочего тела на входе в газовую турбину 1700°C максимальное значение электрического КПД нетто составляет 56,9%, КИТТ 103,2%, удельный полезный отпуск тепловой энергии $23,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг п.г.}}$, а избыток массового расхода конденсата 12% относительно расхода впрыска. Определено, что повышение температуры прямой сети (при снижении температуры наружного воздуха в отопительный сезон) приводит к росту затрат мощности на ТНУ и снижению полезного отпуска электроэнергии.

7. Проанализировано влияние температуры воды на входе в активную насадку КТАНа (в диапазоне от 5 до 40°C) на показатели работы установки. Рост КПД нетто по отпуску электроэнергии в рассмотренном диапазоне составляет от 10 (температура за КС 1700°C) до 23% (температура за КС 1200°C).

8. Установлено, что в режимах с температурой газов на входе в газовую турбину от 1200°C до 1700°C избыток полученного в КТАН расхода конденсата относительно расхода впрыска составляет от 1 до 12%, увеличиваясь с ростом температуры.

9. Максимальный КИТТ характерен для режимов работы ГПУ при низких степенях сжатия в компрессоре. Характер изменения полученных зависимостей КИТТ обусловлен значительным влиянием величины впрыска. Высокий впрыск позволяет получить более высокую теплопроизводительность активной насадки КТАНа за счет полезного использования скрытой теплоты конденсации водяных паров из парогазовой смеси. В режимах оптимальных с точки зрения полезного отпуска электроэнергии (максимальная степень сжатия) КИТТ изменяется от 98 до 103%, увеличиваясь с ростом температуры за КС от 1200 до 1700°C.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК:

1. **Туболев А.А.** Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты / Н. Н. Галашов, А. А. Туболев, В.В. Беспалов, А.А. Минор, Е.С. Болдушевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2022. – Т. 333, № 5. – с. 43-55.

2. **Туболев А.А.** Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели / Н. Н. Галашов, А. А. Туболев, А. А. Минор, А. И. Баннова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2021. – Т. 332, № 12. – с. 124-135.

3. **Галашов Н.Н.** Расчет влагосодержания уходящих газов котла на выходе конденсационного теплоутилизатора [Текст] / Галашов Н.Н., Туболев А.А., Киселев А.С. // Промышленная энергетика. – 2018. – №12. – с. 23-26.

Публикации, проиндексированные в базах данных SCOPUS и Web of Science:

4. **Туболев А.А.** Анализ эффективности газопаровых установок с впрыском пара в камеру сгорания и использованием теплоты уходящих газов в конденсационном теплоутилизаторе / Н. Н. Галашов, А. А. Туболев, Д. В. Мельников, А. С. Киселев // ПОКОЛЕНИЕ БУДУЩЕГО: Взгляд молодых ученых-2019: Сборник научных статей 8-й Международной молодежной научной конференции, в 6-х томах, Курск, 13–14 ноября 2019 года / Ответственный редактор Горохов А.А. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – с. 136-139.

5. **Tubolev A.A.** Economic efficiency of a gas-turbine topping for steam reheating at heating turbo-installations / O. Yu. Romashova, A.A. Tubolev [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 91: Smart Grids 2017. – 01009.

6. **Tubolev A.A.** The effectiveness of absorption heat pumps application for the increase of economic efficiency of CHP operation / A.A. Tubolev, D. S. Luzhkovoy [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 92: Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016). – 01054.

7. **Tubolev A.A.** Efficiency of steam reheating in heat recovery steam generator at thermal power plant with gas turbine topping / O. Yu. Romashova, A.A. Tubolev [et al.] // MATEC Web of Conferences. – Les Ulis: EDP Sciences, 2017. – Vol. 110: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (HMTTSC 2017). – 01054.

8. **Tubolev A.A.** Inclusion of absorption heat pumps into heat power plant scheme for stage heating efficiency increase of delivery water / O. Yu. Romashova, A.A. Tubolev [et al.] // MATEC Web of Conferences. – Les Ulis: EDP Sciences, 2017. – Vol. 110: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (HMTTSC 2017). – 01073.

9. **Tubolev A.A.** Selection of optimal reheat temperature in heat recovery boiler at combined heat and power plant with GT-topping [Electronic resource] / O. Yu. Romashova, A.A. Tubolev [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141: Smart Grids 2017. – 01029.

10. **Tubolev A.A.** The analysis of the external factors influence on the efficiency of the absorption heat pumps inclusion in the scheme of a two-stage line installation of a STP / A.A. Tubolev, D. S. Luzhkovoy [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141: Smart Grids 2017. – 01059.

11. **Tubolev A.A.** Cost Price of Products in the System of Heat, Refrigeration and Electric Energy Production Combined at Thermal Power Plant / A. A. Tubolev, O. Yu. Romashova, L. A. Belyaev // MATEC Web of Conferences. – Les Ulis: 2016. – Vol. 72: Heat and Mass Transfer in the

System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016). – 01116.

12. **Туболев А.А.** Экономическая эффективность газотурбинной надстройки для промежуточного перегрева пара на теплофикационных турбоустановках / О. Ю. Ромашова, А. А. Туболев [и др.]; науч. рук. О. Ю. Ромашова // Интеллектуальные энергосистемы труды IV Международного молодёжного форума, 10-14 октября 2016 г., г. Томск: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ). – 2016. – Т. 1. – с. 260-264.

13. **Туболев А.А.** Себестоимость продукции в системе совместной выработки тепла, холода и электроэнергии на ТЭЦ [Электронный ресурс] / О. Ю. Ромашова, А. А. Туболев; науч. рук. О. Ю. Ромашова // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума, 28 сентября - 2 октября 2015 г., г. Томск: в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2015. – Т. 2. – с. 38-42.

14. **Туболев А.А.** Анализ работы теплофикационных турбоустановок в составе системы тригенерации в летний период / О. Ю. Ромашова, А. А. Туболев [и др.] // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2015 г., Томск: в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) [и др.]; ред. кол. В. В. Литвак [и др.]. – Т. 1. – с. 363-367.

Другие результаты интеллектуальной деятельности:

15. **Туболев А. А.,** Беляев Л.А., Ромашова О.Ю., Шевелев С.А., Матвеев А.С. Расчет цикла газотурбинной установки с регенерацией и промежуточным охлаждением. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016660766, 21 сентября 2016 г.

16. **Туболев А. А.,** Беляев Л.А., Ромашова О.Ю., Шевелев С.А., Зайцев А.С. Расчет цикла газотурбинной установки с промежуточным охлаждением. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016660767, 21 сентября 2016 г.

17. **Туболев А. А.,** Беляев Л.А., Ромашова О.Ю., Шевелев С.А., Матвеев А.С. Расчет цикла простой газотурбинной установки. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016660768, 21 сентября 2016 г.

18. **Туболев А. А.,** Беляев Л.А., Ромашова О.Ю., Шевелев С.А., Кондаков А.А. Расчет цикла газотурбинной установки с регенерацией. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016660769, 21 сентября 2016 г.

19. **Туболев А. А.,** Галашов Н.Н., Минор А. А. Расчет схем газопаровых установок с утилизацией теплоты уходящих газов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2022660396, 14 июня 2022 г.